

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о. завідувач кафедри.

Орлов А.Т.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2020 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за спеціальністю 153 Мікро- та наносистемна техніка
(код і назва)

на тему: Наддовгі волоконно-оптичні лінії зв'язку з використанням оптичних підсилювачів Рамана

Виконав: студент 4 курсу, групи ДП-62
(шифр групи)

Токач Андрій Іванович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник Домбругов Михайло Ремович, доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с. Свечніков Г.С.

Консультант з інформаційних питань доц.. к.т.н., Діденко Ю.В.

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає записок з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 р.

Завдання на дипломну роботу

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроніки

(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 153 Мікро- та наносистемна техніка

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувач кафедри

Орлов А.Т.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ на дипломну роботу студенту

Студент групи ДП-62 **Токач Андрій Іванович**

(група, прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Наддовгі волоконно-оптичні лінії зв'язку з використанням оптичних підсилювачів Рамана**

Керівник роботи: **Домбругов Михайло Ремович, доцент**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » ____ 20__ р. № ____

2. Термін подання студентом роботи: **1 червня 2020р.**
3. Вихідні дані роботи: карта оптичних кабелів і необслуговуваних регенераційних пунктів по Україні, типові компоненти системи ВОЛЗ.
4. Перелік питань, які мають бути розроблені (зміст роботи)
 - 1) Пошук та ознайомлення з літературними джерелами за темою практики.
 - 2) Ознайомлення з картою оптичних кабелів і необслуговуваних регенераційних пунктів (НРП) по Україні основних магістральних операторів.
 - 3) Аналіз поточного стану ринку обладнання для волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ).
 - 4) Вивчення принципів роботи ВОЛЗ типу «Нічого в лінії», («Nothing in line», NIL).
 - 5) Вивчення принципу дії раманівських підсилювачів.

- 6) Розробка конфігурації обладнання для ВОЛЗ типу NIL між містами в Україні на основі існуючих на ринку пропозицій.
- 7) Оформлення звіту, перевірка, захист.
5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо)
- 1) Структура ВОЛЗ
 - 2) Схематичне зображення DWDM системи
 - 3) Механізм ВКР
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план виконання роботи

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Пошук та ознайомлення з літературними джерелами за темою практики	01.03.20	
2	Ознайомлення з картою оптичних кабелів і необслуговуваних регенераційних пунктів (НРП) по Україні основних магістральних операторів	15.03.20	
3	Аналіз поточного стану ринку обладнання для волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ)	22.03.20	
4	Вивчення принципів роботи ВОЛЗ типу «Нічого в лінії», («Nothing in line», NIL)	15.04.20	
5	Вивчення принципу дії раманівських підсилювачів	03.05.20	
6	Розробка конфігурації обладнання для ВОЛЗ типу NIL між містами в Україні на основі існуючих на ринку пропозицій	15.05.20	
7	Оформлення звіту, перевірка, захист.	01.06.20	

Студент

(підпис)

А.І. Токач
(ініціали, прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

М.Р. Домбругов
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота присвячена наддовгим волоконно-оптичним лініям зв'язку (ВОЛЗ) типу «Nothing in line» (NIL) з використанням оптичних підсилювачів Рамана на кінцевих пунктах прийому/передачі. Метою роботи прокладання нового шляху ВОЛЗ в Україні довжиною понад 300 км та розрахунок потрібних параметрів раманівських підсилювачів для ВОЛЗ типу NIL та інших елементів системи.

У роботі приведено аналіз та детальний розрахунок параметрів підсилювача та підбір інших структурних елементів. Прокладання нового шляху ВОЛЗ в Україні було обрано для задоволення потреб населення та розроблено у вигляді карти. Розрахункова частина роботи була розрахована ручним методом, без використання сторонніх програм. Загальний обсяг роботи: 70 сторінок, 25 ілюстрацій, 5 таблиць, 20 посилань, 0 додатків.

Ключові слова/аббревіатури роботи: раманівський підсилювач, оптичне волокно, ВОЛЗ, лінія зв'язку, WDM, DWDM, система, вимушене комбінаційне розсіювання, кабель.

ABSTRACT

The thesis is devoted with ultra-long fiber optic communication lines (FOCL) «Nothing in line» (NIL) type using Raman optical amplifiers at the endpoints of transmit/receive. The purpose of the work is the laying of a new path of FOCL in Ukraine with a length of 300 km and the calculation of the required parameters of Raman amplifiers for FOCL type NIL and other system elements.

The analysis and detailed calculation of amplifier parameters and selection of other structural elements are presented in the paper. The laying of a new pathway for FOCL in Ukraine was chosen to meet the needs of the population and was developed as a map. The calculated bristle work was calculated by manual method, without the use of third-party programs. Total workload: 70 pages, 25 illustrations, 5 tables, 20 links, 0 applications.

Keywords/acronyms for work: Raman amplifier, optical fiber, FOCL, communication line, WDM, DWDM, system, forced Raman, cable.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП.....	10
1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	11
1.1. Актуальність теми	111
1.2. Огляд поточного стану технології ВОЛЗ.....	122
1.2.1. Структура ВОЛЗ	12
1.2.2. Основні компоненти ВОЛЗ.....	15
1.2.3. Переваги ВОЛЗ.....	Ошибка! Закладка не определена.
1.2.4. Недоліки ВОЛЗ.....	Ошибка! Закладка не определена.
1.3. Мета роботи	15
2. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ КАБЕЛІ ТА ЇХ ПРОКЛАДАННЯ.....	19
2.1. Типи оптичних волокон.....	19
2.2. Одномодові волокна.....	21
2.2.1. Стандартне волокно	21
2.2.2. Волокно з ненульовою зміщеною дисперсією.....	22
2.2.3. Волокно зі зміщеною дисперсією	22
2.2.4. Волокна зі зміщеною дисперсією та відсічкою	24
2.2.5. Волокна з великим ефективним перерізом	23
2.3. Оптичний кабель	24
2.3.1. Зовнішні кабелі	25
2.3.2. Внутрішні кабелі	24
2.4. Гофротруба.....	25
2.4.1. Труба двостінна, поліетиленово гофрована труба	26
2.4.2. Захисна труба поліетиленова.....	26
2.4.3. Труба гофрована.....	27
2.5. Технологія прокладання	27

2.6. Оператори міжміських кабельних мереж в Україні	27
2.6.1. Atracom.....	27
2.6.2. Eurotranstelecom	28
2.6.3. Інтертелеком.....	29
3. СИСТЕМИ WDM / DWDM ТА ЇХ АКТИВНІ КОМПОНЕНТИ.....	30
3.1. Технологія та принцип роботи WDM	31
3.1.1. Застосування технології WDM.....	322
3.1.2. Розвиток WDM-системи.....	333
3.2. DWDM.....	344
3.3. Спектральні області в DWDM-системах	355
3.3.1. S-область.....	355
3.3.2. C-область.....	366
3.3.3. L-область.....	377
3.4. Спотворення сигналів в DWDM-системі.....	37
3.5. Мультиплексори і демультиплексори.....	41
3.5.1. Оптичний мультиплексор введення/виведення OADM.....	42
3.6. Оптичний модуль або трансивер та його типи	43
3.6.1. XFP	43
3.6.2. SFP+.....	43
3.6.3. SFP	44
3.7. Оптичне підсилення	44
3.7.1. Ербієвий волоконний підсилювач.....	45
3.7.2. Раманівський оптичний підсилювач	46
3.7.3. Напівпровідниковий оптичний підсилювач.....	46
3.8. Повторювач.....	47
3.9. Основні фактори роботи DWDM-системи	48
3.9.1. Вихідна потужність підсилювача.....	48
3.9.2. Відстань між підсилювачами.....	48
3.9.3. Тип волокна	49

3.9.4. Число каналів.....	49
3.9.5. Швидкість передачі на канал (канальна швидкість)	49
4. РАМАНІВСЬКІ ПІДСИЛЮВАЧІ	50
4.1. Вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР)	50
4.2. Коефіцієнт підсилення.....	52
4.2.1. Коефіцієнт підсилення слабкого сигналу ВКР-підсилювачем (ON/OFF-підсилення)	52
4.2.2. Коефіцієнт підсилення з урахуванням насичення.....	52
4.3. Переваги та недоліки підсилювача.....	53
5. РОЗРАХУНОК ВОЛЗ ТИПУ «NOTHING IN LINE» (NIL).....	55
5.1. Вибір обладнання	56
5.1.1. Оптичний кабель	56
5.1.2. Гофротруба	57
5.1.3. Оптичні модулі.....	61
5.1.4. Раманівські підсилювачі.....	62
5.2. Розрахункова частина системи	64
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	69

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

CWDM — Coarse Wavelength Division Multiplexing — мультиплексування з широким спектром довжини хвилі;

DWDM — Dense Wavelength Division Multiplexing — мультиплексування поділу щільної хвилі;

EDFA — Erbium Doped Fiber Amplifiers — підсилювач волокон легований ербієм;

FWM — Four Wave Mixing — чотирьох хвильове зміщення;

ILAs — In Line Amplifiers — лінійні підсилювачі;

ITU — International Telecommunications Union — міжнародний союз телекомунікацій;

NIL — Nothing In Line — нічого в лінії;

SOA — Semiconductor Optical Amplifier — напівпровідниковий оптичний підсилювач;

WDM — Wavelength Division Multiplexing — мультиплексування з поділом довжини хвилі;

ВКР — Вимушене Комбінаційне Розсіювання;

ВОЛЗ — Волоконно-Оптичні Лінії Зв'язку;

КРС — Комбінаційне Розсіювання Світла;

ПМД — Поляризаційна Модова Дисперсія;

ФСМ — Фазова Само Модуляція;

ЧХЗ — Чотирьох Хвильове Зміщення.

ВСТУП

Передача інформації — тема, яка була актуальна у всі десятиліття. Початковою технологією передачі інформації є димові сигнали, які з плином часу та розвитком технологій переросли в телеграф, коаксіальний кабель. Кожна з технологій зазнавала свого максимуму в розвитку, або технічні обмеження. Так на зміну мідному кабелю, який вже не задовольняв потреби людства та мав великий ряд недоліків, прийшла технологія ВОЛЗ. Волоконно-оптична лінія зв'язку призначена для передачі інформації в оптичному діапазоні.

Історія ВОЛЗ починається вже пару десятиліть, а саме з XIX століття, саме тоді був вперше продемонстрований принцип передачі світла, який зараз і використовується в ВОЛЗ, але розвиток технології такої ми знаємо її зараз, тоді не почався, ВОЛЗ бере свій початок з 1950-их років. Винахід лазера зробило можливим побудову ВОЛЗ, яка перевищує по характеристикам всі інші технології передачі інформації.

Головним компонентом в технології ВОЛЗ є підсилювач. На сьогодні популярними в застосуванні є EDFA підсилювачі — леговані ербієм, але вони мають граничний робочий діапазон, ефективність менша ніж у раманівських підсилювачів, при великій потужності накачування. Тому для використання на довгих ділянках ВОЛЗ використовують раманівські підсилювачі, вони засновані на вимушеному комбінаційному розсіюванні, при якому потужність накачування перетворюється у випромінювання на частоті сигнальної хвилі.

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1. Актуальність теми

В ХХІ столітті тема ВОЛЗ не втрачає своєї актуальності, а тільки її набирає, кожного дня число людей, які починають користуватися технологією ВОЛЗ і забувають про мідні кабелі — росте. Мідні кабелі мають дуже багато недоліків, основним є дуже мала швидкість передачі даних, а це саме та характеристика, яка потрібна людству, що вже говорити про електромагнітні перешкоди, заземлення, затування. Так, ВОЛЗ теж має свої недоліки, але в порівнянні з перевагами, мінусами технології можна знехтувати, а можливо в майбутньому можна буде перетворити їх на плюси, так як технологія тільки розвивається.

ВОЛЗ типу «Nothing in line» (NIL), тобто нічого в лінії — коли від одного пункту до іншого на протязі всієї довжини немає додаткового обладнання для обслуговування, підсилення і тд. Ця тема є важливою через те, що:

1. Навіть на суші обслуговування кожного регенераційного пункту в лінії влітає в копійчку.

2. На морі це взагалі серйозна проблема. Наприклад, Греція тільки після того, як змогла відпрацювати технологію передачі на 150-170 км змогла встановити нормальний зв'язок зі своїми численними островами в Егейському морі.

3. На трансокеанських кабелях вбудований підсилювач в лінію доводиться влаштовувати на дні, подаючи їй електроенергію з берега. Технологія теж не із дешевих.

1.2. Огляд поточного стану технології ВОЛЗ

На відміну від передачі на основі мідного дроту, де передача повністю залежить від електричних сигналів, що проходять через кабель, передача волоконної оптики передбачає передачу сигналів у вигляді світла від однієї точки до іншої. Крім того, волоконно-оптична мережа зв'язку складається з передавального та приймального ланцюгів, джерел світла та детекторів. Волокно є кращим ніж електричний кабель — коли потрібна велика пропускна здатність, велика відстань або захист від електромагнітних перешкод. ВОЛЗ має хороші результати при передачі даних на великій відстані з високою швидкістю, використовувалася як додаток для різних цілей зв'язку.

1.2.1. Структура ВОЛЗ

Одиничний волоконний світловод використовується для одноканального і для багатоканального зв'язку в одному і двох напрямках. Для передачі декількох каналів зв'язку застосовується мультиплексування або ущільнення каналів.

Інформація по ВОЛЗ може передаватися у двох видах — це безпосередньо в аналоговому вигляді, коли аналоговим сигналом (телевізійним, звуковим, телеметричним) модулюється оптична несуча. Другий спосіб передачі — це попередня дискретизація сигналу (перетворення аналогового сигналу в цифровий) і потім передача цифрового сигналу на фотоприймач також за допомогою оптичної несучої. Найбільш широко в ВОЛЗ застосовується цифровий спосіб передачі інформації. Однією з найважливіших ВОЛЗ є інформаційна пропускна здатність. [6]

Інформаційна пропускна здатність каналу або швидкість передачі інформації — це характеристика, що показує кількість інформації в біт/секунду, яку здатний передати канал без спотворень, 1 біт/с являє собою 1 двійкову цифру (0,1).

У цифрових лініях зв'язку якість переданої інформації характеризується коефіцієнтом бітових помилок. Чим більша величина бітових помилок, тим більша ймовірність прийняти 0 за одиницю і тим більша ймовірність помилок при передачі інформації. Ймовірність помилок зростає зі зменшенням амплітуди імпульсів і збільшення їх ширини. Розширення імпульсів у ВОЛЗ обумовлено дисперсією оптичних волокон. Дисперсія також є причиною зменшення амплітуди імпульсів, так як розширення імпульсів неминуче супроводжується зменшенням їх амплітуди. Але в значно більшому ступені зменшення амплітуди імпульсів (загасання) обумовлено втратами потужності випромінювання у волокні. Таким чином, втрати потужності оптичного випромінювання і дисперсія є основними характеристиками оптичних волокон.

На відміну від електричних ліній зв'язку, де втрати потужності залежать від частоти переданих сигналів, в оптичних волокнах втрати потужності світла не залежать від швидкості передачі даних. Тому, при низьких швидкостях передачі інформації, гранично допустима відстань між передавачем і приймачем (або між ретрансляторами) обмежується загасанням світла, обумовленим втратами в волокні, а при високих швидкостях в основному дисперсією і в меншій мірі втратами.

В даний час в більшості магістральних ВОЛЗ застосовуються оптичні підсилювачі, і в цих лініях відстань між ретрансляторами, обмежується тільки дисперсією в оптичних волокнах. У наземних ВОЛЗ ця відстань може досягати 1000 км, а в підводних — до 10 000 км. Швидкість передачі даних в більшості таких ВОЛЗ становить 10 Гбіт/с (стандарт STM-64) і 40 Гбіт/с (стандарт STM-256).

З впровадженням оптичних підсилювачів в ВОЛЗ стало економічно доцільним здійснювати передачу інформації сигналів по одному волокну одночасно на декількох довжинах хвиль, використовуючи технології спектрального ущільнення або ущільнення по довжинах хвиль (DWDM — Dense

Wavelength Division Multiplexing технології). В цьому випадку пропускна здатність ВОЛЗ збільшується в декілька разів і дорівнює кількості цих довжин хвиль. Одним з останніх рекордів є передача по одному волокну інформації зі швидкістю 10,2 Тбіт/с (1 Тбіт/с = 1 терабіт/сек = 10^{12} біт/с). При цьому загальне число довжин хвиль, що передаються по 1 каналу становила 273, а швидкість передачі в кожному каналі дорівнювала 40 Гбіт/с. [1]

Через оптичне волокно можуть передаватися і безпосередньо аналогові сигнали, наприклад, телеметричні, сигнали від оптичних датчиків і перетворювачів, телевізійні сигнали. Так як волокно є дисперсійним середовищем і поводить, як фільтр нижніх частот, частота зрізу якого обернено пропорційна довжині волокна, то при передачі аналогових сигналів виникають фазові спотворення. В цьому випадку волокно може характеризуватися таким параметром як ширина смуги пропускання на відстань — МГц/км. При цьому якість каналу передачі в аналогових ВОЛЗ визначається відношенням сигнал/шум (С/Ш або S/N в англійській аббревіатурі). [6]

При аналізі та розрахунку параметрів ВОЛЗ зручно висловлювати значення різних рівнів потужності оптичного сигналу у відносних одиницях, зокрема, в ВОЛЗ цією відносною одиницею є ДБМ, яка характеризує рівень потужності по відношенню до 1 мВт (10^{-3} Вт). Це загальноприйняте ставлення в техніці зв'язку.

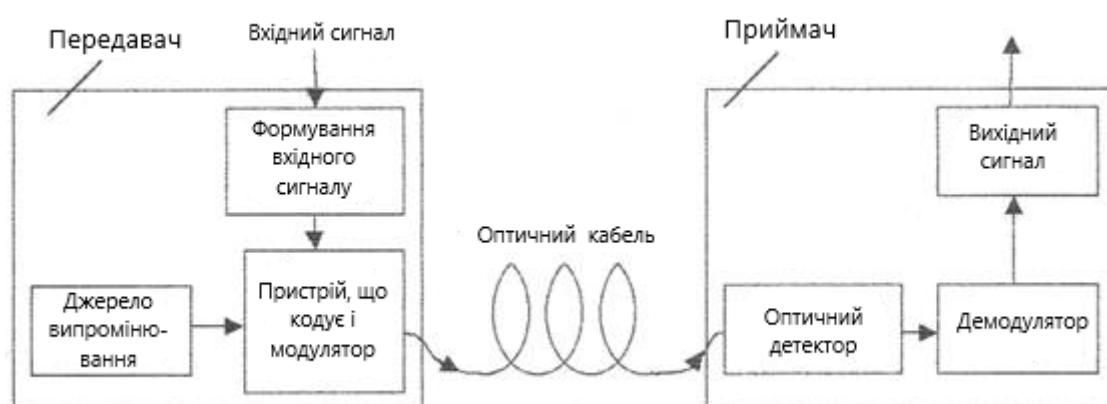


Рис. 1.1 — Структура ВОЛЗ [6]

1.2.2. Основні компоненти ВОЛЗ

Оптичний передавач забезпечує перетворення вхідного електричного сигналу в вихідний світловий сигнал. Залежно від того на яку відстань використовувати ВОЛЗ, джерела світла розрізняють на світлодіоди та лазерні діоди. Світлодіоди за своєю вартістю є дешевшими і застосовуються для систем з низькими втратами на короткі відстані. Недоліки: низький рівень ефективності, виробляють некогерентне світло. Будь-яка хроматична дисперсія обмежує у волокну пропускну здатність системи, через те, що спектральна ширина має значення від 30 до 60 нм.

Лазерні діоди є дорогими, але використовуються для більшої відстані, вони мають високу: швидкість передачі даних та потужність. Головні переваги це більш ефективна передача світла в кабель та дуже вузька спектральна пропускну здатність внаслідок того, що вони виробляють когерентне світло. Вузька спектральна ширина дозволяє лазерам передавати дані зі значно більшими швидкостями, оскільки модальна дисперсія менш очевидна. Недоліками є те що вони за своєю суттю нелінійні та більш чутливі до перепадів температури.

Оптичний приймач здійснює зворотнє перетворення вхідних оптичних імпульсів у вихідні імпульси електричного струму. Компонент, який лежить в основі приймача, — це фотодетектор. Зазвичай це напівпровідниковий пристрій і може бути р-n-переходом, контактним фото-діодом або лавиновим фото-діодом. Фото-транзистори не використовуються, оскільки вони не мають достатньої швидкості.

Після того, як оптичний сигнал з волоконно-оптичного кабелю застосовано до фотодетектора та перетворений в електричний формат, він може бути оброблений для відновлення даних, які потім можуть бути передані до його кінцевого пункту призначення.

Відстань на яку може передаватися сигнал по волоконно-оптичному кабелю є обмеженою. Це обмежується не тільки ослабленням кабелю, але і спотворенням світлового сигналу вздовж кабелю. Для цього додатково використовують один або декілька проміжних регенераційних пристроїв для посилення послаблюючого в процесі поширення оптичного сигналу, а також для відновлення фронтів імпульсів і передачі сигналів на більші відстані. В якості таких пристроїв використовуються повторювачі і оптичні підсилювачі.

Повторювач складається з оптичного приймача, електричного підсилювача і оптичного передавача. Ці пристрої перетворюють оптичний сигнал в електричний, де він може бути оброблений, щоб гарантувати, що сигнал не спотвориться, а потім сигнал перетворюється назад в оптичний. При передачі дискретного сигналу електричне посилення, як правило, може супроводжуватися відновленням фронтів і тривалості переданих імпульсів. Для цього повторювач приймає оптичний сигнал в синхронному або асинхронному режимі, в залежності від стандарту передачі. [1]

При синхронному режимі приймальний пристрій повторювача регулярно приймає синхроімпульси, на підставі яких налаштовує свій таймер, задає частоту для подальшої передачі. Існує безперервний бітовий потік в лінії. І навіть якщо немає передачі даних, синхроімпульси продовжують надходити. У передавальну послідовність повторювач додає синхроімпульси, призначені каскаду для синхронізації наступного. При асинхронному режимі передана інформації організовується в спеціальні пакети даних — кадри. Кожному пакету передують послідовність однотипних груп бітів — преамбула. Саме преамбула забезпечує синхронізацію приймального пристрою, який до початку приймання знаходиться в режимі очікування. Повторювач, який відновлює форму оптичного сигналу до первісної, називається регенератором.

Оптичний підсилювач не здійснює оптоелектронного перетворення, як це робить повторювач або регенератор. Він, використовуючи спеціальні активні

середовища і лазери накачування, безпосередньо підсилює пройдений оптичний сигнал, завдяки індукованому випромінюванню. Таким чином, підсилювач не наділений функціями відновлення прогальності, у чому поступається повторювачу. Однак, є дві основні причини, які роблять застосування підсилювача кращим. [1]

Слід мати на увазі, що якість сигналів, які передаються через оптичне волокно, навіть якщо сегмент протяжний, залишається дуже високою внаслідок малої дисперсії і загасання. Також не великий рівень внесених шумів через схильності волокна до впливу електромагнітного випромінювання. Тому ретрансляція переданих даних простим посиленням без повної регенерації стає досить ефективною.

Оптичний підсилювач є більш універсальним пристроєм, оскільки на відміну від регенератора він не прив'язаний до стандарту сигналу який передається або певній частоті модуляції. На практиці на один регенератор може припадати кілька послідовно розташованих оптичних підсилювачів (до 4-8). Таким чином, ефективність використання оптичних підсилювачів при побудові волоконно-оптичних магістралей великої протяжності дуже висока.

Волоконно-оптичний кабель. Характерна будівельна довжина оптичного кабелю (довжина безперервної ділянки кабелю, що поставляється на одному барабані) варіюється в залежності від виробника і типу кабелю в межах 2-40 км. На протяжних ділянках між повторювачами можуть поміщатися десятки будівельних довжин кабелів. У цьому випадку проводиться спеціальне зрощування (як правило, зварювання) оптичних волокон. На кожній такій ділянці кінці ВОК захищаються спеціальною герметичною прохідною муфтою.

1.2.3. Переваги ВОЛЗ

1. Широка смуга пропускання — передача по одному оптичному волокну інформації в кілька terabit в секунду.

2. Мале загасання сигналу — дозволяє будувати ділянки ліній без ретрансляції протяжністю 100 км і більше.

3. Збільшення смуги пропускання, через низький рівень шумів.

4. Діелектричний матеріал забезпечує захист від електромагнітних перешкод.

5. Відсутність електричних петель — гальванічна розв'язка за рахунок ізолюючих властивостей.

Та інші: зменшення в об'ємі та вазі, тривалість експлуатації, віддаленість електроживлення. [1]

1.2.4. Недоліки ВОЛЗ

Вартість обладнання та технічні роботи — монтаж і обслуговування. [1]

В порівнянні з перевагами, недоліки ВОЛЗ є настільки незначними, що аж ніяк не заважають подальшому розвитку технології в майбутньому.

1.3. Мета роботи

Ознайомитися з картою оптичних кабелів і необслуговуваних регенераційних пунктів (НРП) по Україні основних магістральних операторів. Вивчити сьогоdnішній стан справ ВОЛЗ на ринку — хто їх виробляє, за якою ціною, які їх основні параметри. Ознайомитись з будовою, принципом та характеристиками елементів ВОЛЗ. Вивчити принцип дії раманівського підсилювача. Як за рахунок установки підсилювачів на одному або обох кінцях ВОЛЗ можна подовжити ділянку передачі N1L. Запропонувати конфігурацію обладнання для лінії зв'язку N1L між містами в Україні — Миколаїв (Миколаївська область) та Кременчук (Полтавська область) через Кропивницький (Кіровоградська область). Розрахувати параметри компонентів системи та підібрати відповідні до параметрів обладнання на ринку.

2. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ КАБЕЛІ ТА ЇХ ПРОКЛАДАННЯ

Оптичне волокно — кабелі, які можуть направляти промінь світла. Його називають циліндричним оптичним хвилеводом, оскільки світло — це хвиля. Волоконно-оптичний кабель має низькі втрати та високу гнучкість, через те, що виготовлений з прозорих матеріалів — скло, пластик.

2.1. Типи оптичних волокон

В залежності від потреби в кількості переданого сигналу (режиму світла) по волокну розрізняють два типи волокон — одномодове та багатомодове. Одномодове використовують для передачі одного сигналу на волокно, а багатомодове для багатьох сигналів — за рахунок товщини серцевини. Хоча одномодові волокна мають менший радіус серцевини, через це мають більшу пропускну здатність, за рахунок відсутності міжмодової дисперсії, що робить їх кращими ніж багатомодові. Недолік одномодового волокна — важкість з'єднання та дорогі лазерні передавачі.

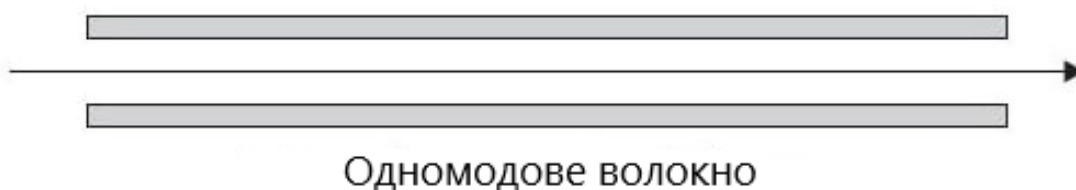


Рис. 2.1 — Одномодове волокно [12]



Рис. 2.2 — Багатомодове волокно [12]

Одномодові та багатомодові волокна розділяють на декілька типів. Одномодові бувають: стандартне, зі зміщеною дисперсією, зі зміщеною довжиною хвилі відсічки, з ненульовою зміщеною дисперсією та з великим ефективним перерізом. Багатомодові можуть бути або ступеневі, або градієнтні.

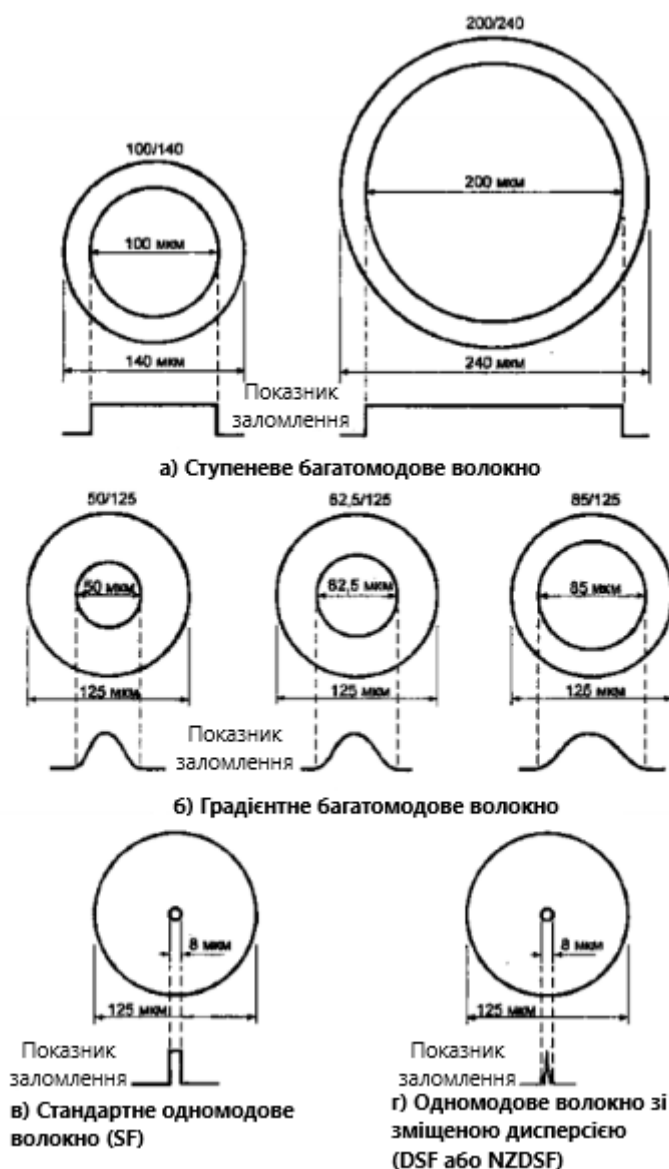


Рис. 2.3 — Типи та розміри оптоволокон [1]

Всі типи волокон мають однаковий склад: серцевина з показником заломлення і оболонка. Серцевина виготовляється з щільного матеріалу, за рахунок того, що по ній відбувається поширення світлового сигналу. Оболонка кабелю є кольоровою — це допомагає зрозуміти, який тип використовується,

зазвичай жовтим позначають одномодове, а помаранчевим — багатомодове. Волокна можуть розрізнятися по значенню діаметра складових та профілем показника заломлення. У багатомодового градієнтного та одномодового зі зміщеною дисперсією волокна, показник заломлення залежить від радіуса. Волокно з найменшою пропускною здатністю — ступеневе багатомодове. Воно поступається градієнтному в технічних характеристиках по дисперсії. [1]

2.2. Одномодові волокна

2.2.1. Стандартне волокно

Оптичне волокно, укладене в кабель, є одним з найважливіших компонентів волоконно-оптичної мережі. Перші волокна, які стали широко використовуватися на лініях зв'язку великої протяжності — одномодові волокна зі ступеневим показником заломлення і нульовою дисперсією на довжині хвилі 1310 нм (G.652 за класифікацією ITU), стандартні одномодові волокна. У 1980-ті роки було прокладено понад 80 мільйонів кілометрів кабелю з такими волокнами. Незважаючи на зростання швидкості передачі даних і появи технології DWDM, що дозволяє у багато разів збільшити пропускну здатність вже прокладеного кабелю, інтенсивність прокладки кабелю в усьому світі в доступному для огляду майбутньому не впаде.

Нульова точка дисперсії знаходиться в 1300 нм і поділена на G.652A, B, C, D. A і B мають пік води, а C і D усувають пік води для роботи повного спектра. Волокна G.652.A і G.652.B розроблені таким чином, щоб мати довжину хвилі з нульовою дисперсією близько 1310 нм, тому вони оптимізовані для роботи в смузі 1310 нм. Більш новітні варіанти, G.652.C і G.652.D, мають зменшений пік води, що дозволяє використовувати їх в області довжин хвиль між 1310 нм і 1550 нм, що підтримує мультиплексовану передачу грубої хвилі (CWDM). [2]

Хоча стандартне волокно G.652 має нульову хроматичну дисперсію на довжині хвилі 1310 нм, його дисперсія на довжині хвилі 1550 нм досить висока

(18 пс/нм* км). На перший погляд, це несумісне з робочим діапазоном EDFA (область 1550 нм). Проте недавні дослідження показали, що передача каналів DWDM помірної швидкості по волокну G.652 може відбуватися на значні відстані без втрати якості сигналу. Багато в чому це досягається за рахунок того, що висока дисперсія на довжині хвилі 1550 нм може бути компенсована за допомогою відрізка спеціального волокна або інших пристроїв компенсації дисперсії.

2.2.2. Волокно з ненульовою зміщеною дисперсією

Для придушення нелінійних ефектів, і особливо FWM, були розроблені волокна, в яких довжина хвилі нульової дисперсії виведена з робочого діапазону підсилювачів EDFA (1530-1565 нм) за рахунок спеціальних профілів показника заломлення — волокна з ненульовою зміщеною дисперсією (G.655 за класифікацією ITU). В межах робочого діапазону EDFA волокно G.655 має невелику, добре контрольовану хроматичну дисперсію (від більш ніж 3 пс/нм*км на 1530 нм до менш ніж 0,7 пс/нм*км на 1560 нм). Такого значення дисперсії цілком достатньо, щоб придушити FWM — при цьому ще можлива передача зі швидкістю щонайменше 2,5 Гбіт/с на канал на відстані близько 1000 км. Волокна G.655 найкращим чином підходять для використання в системах DWDM.

Для нейтралізації ефекту FWM можна також збільшувати проміжки між каналами DWDM або використовувати нерівномірні проміжки. Однак, це вносить обмеження на використання довжин хвиль з частотного плану ITU. [2]

2.2.3. Волокно зі зміщеною дисперсією

У порівнянні з G.652, він має зменшений розмір серцевини, який оптимізований для одномодових систем передачі на довгі відстані з використанням підсилювачів ербієвого волокна (EDFA) та довжини хвилі нульової хроматичної дисперсії, яка зміщена до 1550 нм.

На цій довжині хвилі загасання нижче, ніж на 1310 нм, а тому робота в вікні 1550 нм більш краща, особливо для ліній зв'язку великої протяжності. Однак, волокно зі зміщеною дисперсією не є безумовно кращим для передачі каналів DWDM. Показник дисперсії досить різко змінюється при віддаленні від довжини хвилі нульової дисперсії, через що доводиться окремо компенсувати дисперсію кожного каналу.

Волокно зі зміщеною дисперсією виявилось невдалим при передачі складеного сигналу DWDM. При передачі по каналу зв'язку складеного сигналу DWDM необхідно вводити в волокно сигнал дуже великої потужності, через що в волокні починають проявлятися нелінійні ефекти. У волокні зі зміщеною дисперсією вплив ефекту чотирьох хвильового зміщення FWM обмежує використання довжин хвиль, близьких до довжини хвилі нульової дисперсії 1550 нм. Слід зазначити, що ефект FWM можна зменшити, якщо передавати сигнал DWDM на довжинах хвиль, досить віддалених від довжини хвилі 1550 нм в одну або іншу сторону. Однак, при цьому стає неможливо використовувати будь-які довжини хвиль з частотного плану ITU. [2]

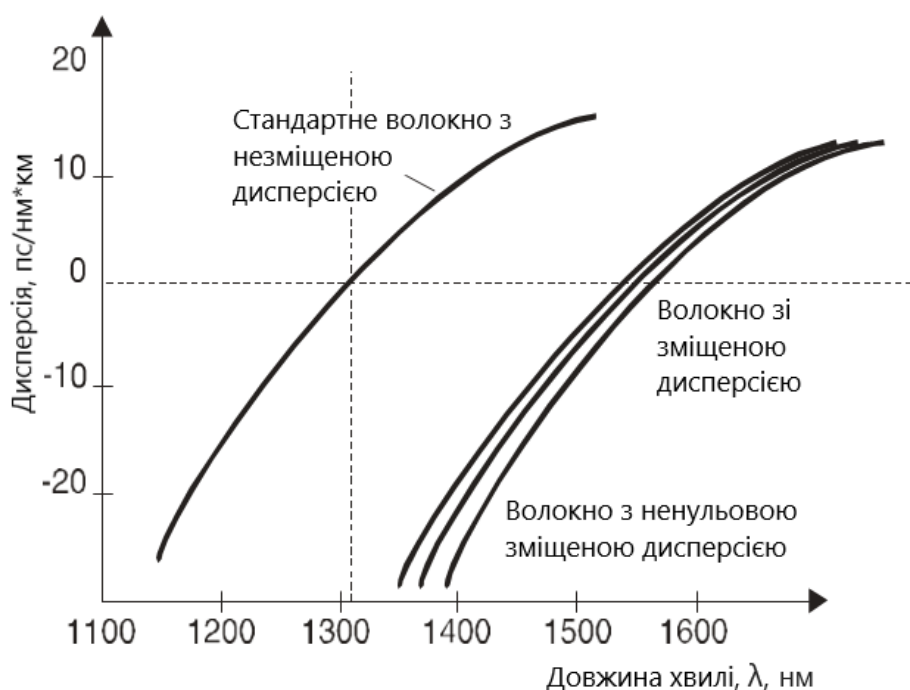


Рис. 2.4 — Типові значення дисперсії для різних типів оптичних волокон [2]

2.2.4. Волокна зі зміщеною дисперсією та відсічкою

У таких лініях потрібно, в першу чергу, забезпечити дуже великі довжини регенераційних ділянок, тобто мінімізувати коефіцієнт загасання. Для цього в якості серцевини використовувався не легований оксидом германію кварц (як це робиться в волокнах G.652), а чистий кварц. А необхідна різниця показників заломлення серцевини і оболонки забезпечувалася додаванням фтору в кварцовий матеріал оболонки. Характерно, що дисперсія при цьому не мінімізувалася в районі 1550 нм (як у волокнах G.653). Це пов'язано з тим, що не було сенсу застосовувати на довгих лініях дорогі волокна, та й потреби в передачі по океанським кабелям надшвидкісних потоків теж особливої не було.

Ще однією особливістю волокон G.654 є зміщення довжини хвилі відсічки ближче до несучої 1550 нм, а саме на значенні 1530 нм. Це забезпечує більш сприятливий електродинамічний режим, при якому найбільша частина енергії, що передається зосереджується в серцевині. [14]

2.2.5. Волокна з великим ефективним перерізом

Подальше придушення нелінійних ефектів можливо за рахунок збільшення ефективної площі перетину серцевини волокна, в якій зосереджена основна частина потужності сигналу, при збереженні одномодового режиму поширення світла. Справа в тому, що нелінійні ефекти залежать не від повної потужності сигналу, а від його інтенсивності — тобто потужності, що припадає на одиницю площі ефективного поперечного перерізу волокна. [2]

2.3. Оптичний кабель

При застосуванні кабелю дивляться не тільки на характеристики волокна, а і на технічні параметри кабелю в якому волокно укладене. З точки зору комерції кабелі бувають трьох типів: зовнішні, внутрішні, або зовнішньо / внутрішні.

Кабелі для внутрішнього та зовнішнього використання повинні мати характеристики обох типів кабелів, що робить їх дорожчими, але вони можуть усунути потребу у з'єднанні.

2.3.1. Зовнішні кабелі

Зовнішні кабелі повинні бути розроблені так, щоб вони змогли прожити до 40 років. Для цього вони мають широкий діапазон робочих температур, стійкі до дії сонячних променів і вологи, мають достатню міцність на розрив на великі відстані тяги, надійний захист від гризунів та блокування води. Блокування води є важливим для зовнішніх кабелів, що запобігати скупченню води в серцевині кабелю, де вода може замерзати і переносити напругу на скляні волокна. У більшості випадків кабелі, призначені для прямого поховання під землею, тому вони повинні містити сталевий стрічкову оболонку, щоб гризуни не заважали. Для повітряної установки зовнішні кабелі повинні бути прив'язані до мережевого проводу.

2.3.2. Внутрішні кабелі

Вимог захисту для внутрішніх кабелів менше, але важливість їх однакова. Вони повинні бути гнучкі, міцні на розриви, простота в експлуатації та вогнестійкі. Найпопулярніший тип внутрішнього кабелю — це герметичний буфер, в якому окремі волокна безпосередньо покриті захисним шаром пластику. Це полегшує прокладку кабелю в шафах та розетках, а також забезпечує сумісність із встановленими на місцях роз'ємами.

2.4. Гофротруба

Гофрована труба для прокладання кабелів — призначена для захисту кабелю при прокладанні його в ґрунт. Така труба має значно меншу гнучкість та розтягування через більше міцний матеріал з якого вона виготовлена. За

допомогою зонду — тонкий сталевий дріт всередині труби — кабель можна затягнути в порожнину, таким чином прискорюється і спрощується монтаж кабелів.

2.4.1. Труба двостінна, поліетиленово гофрована труба

Захисна труба для прокладання кабелю в землі виготовлена з двох видів поліетилену, звідки і сама назва — двостінна. Поліетилен низького тиску (ПНД), з якого створена зовнішня гофрована обойма труби і поліетилен високого тиску (ПВД), з якого зроблений внутрішній шар труби. Двостінні труби для прокладки кабелю в землі забезпечують високу гнучкість при мінімальному радіусі вигину і підвищену міцність.

Поліетилен низького тиску (ПНД) володіє кристалічною структурою, що робить його невагомим і в той же час гнучким, пружним матеріалом, що володіє стійкістю до розчинів солей, лугів, кислот, а також рослинних і мінеральних масел при високих температурах. Матеріал цей біологічно абсолютно інертний.

Поліетилен низького тиску (ПНД) має відмінні електроізоляційні властивості, має високу міцність і при цьому стійких до ударів, що є ще одним плюсом двостінної труби.

2.4.2. Захисна труба поліетиленова

Захисна труба для ВОЛЗ поліетиленова використовується для монтажу волоконно-оптичного кабелю зв'язку з подальшим його захистом від механічних пошкоджень, які виникають від вібрацій, впливу ґрунту, підземних (ґрунтових) вод. Протяжка кабелю здійснюється шляхом механічної пневмопрокладки. Експлуатується при температурі $-30/+65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.4.3. Труба гофрована

Труба гофрована має низьку механічну стійкість. Труба використовується для телекомунікаційних, комп'ютерних кабелів низької напруги. Прокладати в перегородки та стелю шляхом штробування. Для приміщень з низькою присутністю вибухонебезпечної хмари і зон з рідкісним виникненням горючого пилу. Здатна переносити температурний інтервал від - 20 до 90 ° С.

2.5. Технологія прокладання

На даний час існують три технології прокладання кабеля між містами: закопування кабелю в ґрунт, по лініям електропередач, або закопування гофротруби і потім в неї затягувати кабель. Технологія прокладання залежить від типу кабелю. Для технології закопування в ґрунт та по лініям передач потрібно внутрішні кабелі, які мають надійний захист від навколишнього середовища, для технології з допомогою гофрованої труби підходить зовнішній кабель, але на деяких відрізках його потрібно з'єднувати з зовнішньо / внутрішнім кабелем.

2.6. Оператори міжміських кабельних мереж в Україні

Станом на 2020 рік в Україні є три великі компанії які прокладають ВОЛЗ:

2.6.1. Atracom

Atracom прив'язує лінії ВОЛЗ до транспортних шляхів, особливо до автомобільних магістралей, що цінують оператори мобільного зв'язку, а також оператори передачі даних, тому, що їм потрібне рівномірне покриття великих площ України. Загальна протяжність шляхів сягає 24 000 км.

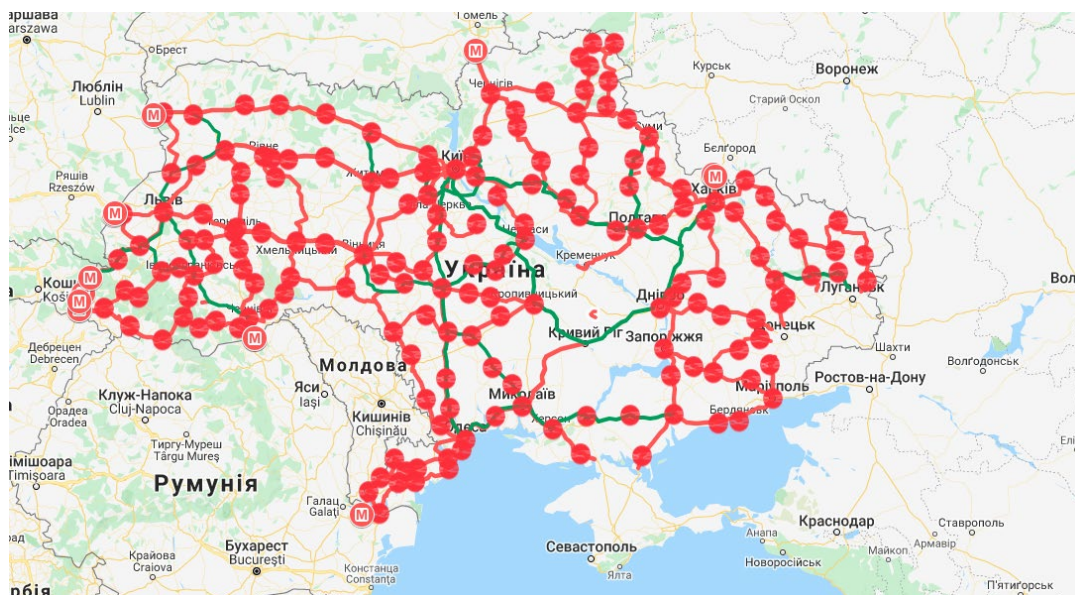


Рис. 2.5 — Карта ВОЛЗ Atracom [9]

2.6.2. Eurotranstelecom

Компанія Eurotranstelecom прив'язує свої лінії ВОЛЗ до залізничних доріг (вздовж) України з метою забезпечення потреб залізничного транспорту в телекомунікації та зв'язку. Вона також має прокладку своїх ліній в Європі та Росії.

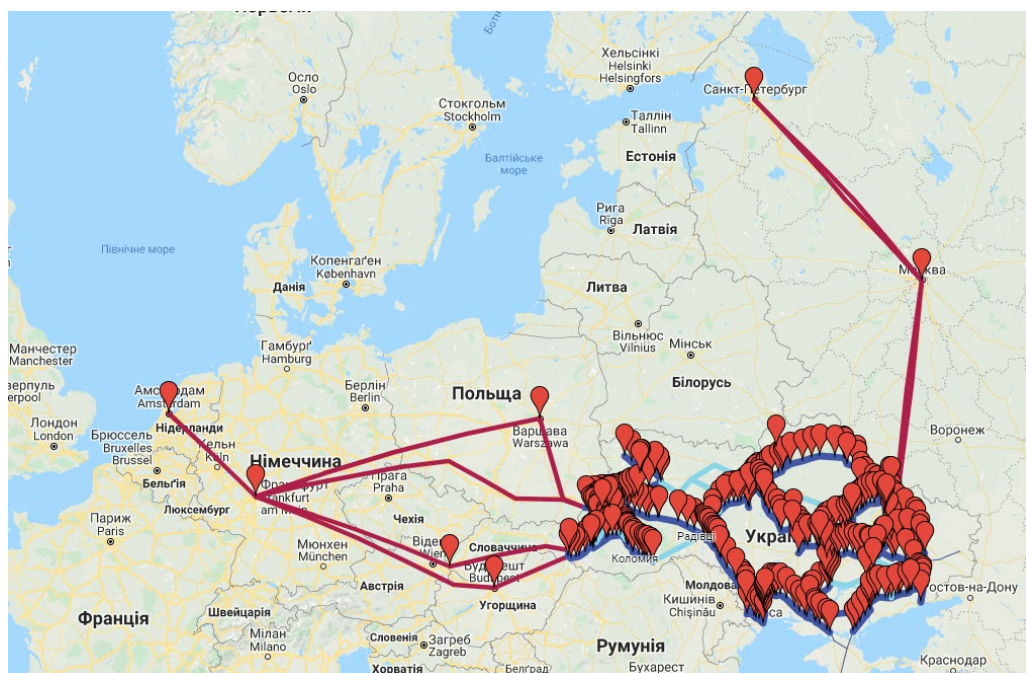


Рис. 2.6 — Карта ВОЛЗ Eurotranstelecom [8]

2.6.3. Інтертелеком

Принцип прокладки схожий з компанією Atrascom, загальна довжина лінії прокладки Інтертелекома перевищує довжину Eurotranstelecoma вдвічі (12 000 км). Базовою технологією є SDH-технологія (Synchronous Digital Hierarchy), яка дозволяє активно використовувати оптичні канали. [10]

3. СИСТЕМИ WDM / DWDM ТА ЇХНІ АКТИВНІ КОМПОНЕНТИ

Мультиплексування — вид технології передачі даних у вигляді сигналів. Декілька сигналів потрібно приймати і об'єднувати в один складений сигнал, щоб відбувалась передача по ВОЛЗ. Існує три основні методи мультиплексування — TDM, FDM та WDM.

TDM (Time Division Multiplexing) — прийом та передача незалежних сигналів по загальному сигнальному шляху за допомогою синхронних комутаторів на кожному з кінців лінії передачі. Він використовується лише коли швидкість передачі бітів середовища перевищує швидкість переданого сигналу. FDM (Frequency Division Multiplexing) — метод, з допомогою якого загальна пропускна здатність доступна в середовищі зв'язку розділяється на ряд неперехресних смуг частот, кожна з яких використовується для передачі окремого сигналу. Це дозволяє обмінюватися єдиним носієм передачі, таким як кабель або оптичне волокно, за допомогою декількох незалежних сигналів.

WDM (Wavelength Division Multiplexing) — збільшує пропускну здатність, дозволяючи одночасно надсилати різні потоки даних по одній мережі оптичних волокон. Таким чином WDM максимізує корисність волокон і допомагає оптимізувати інвестиції в мережу. Технологія WDM схожа на FDM, але передача відбувається через волоконно-оптичні канали. У WDM всі сигнали надходять одночасно, а в TDM вони надходять один за одним. Це відбувається тому, що в TDM сигнали розбиваються та мультиплексуються за часом перед передачею. У TDM отримана ємність — це сукупність або сума всіх вхідних сигналів/каналів. У WDM кожен сигнал передається незалежно від інших, і тому кожен канал матиме власну виділену пропускну здатність. [2]

3.1. Технологія та принцип роботи WDM

Мультиплексування поділом довжини хвилі (WDM) — це оптична технологія мультиплексування з використанням широкої пропускної здатності, властивій оптичним волокнам. Потужним аспектом WDM є те, що кожен оптичний канал може нести будь-який формат передачі. WDM різко збільшує пропускну здатність волоконної мережі, таким чином, визнається транспортною технологією рівня 1 у всіх рівнях мережі. [5]

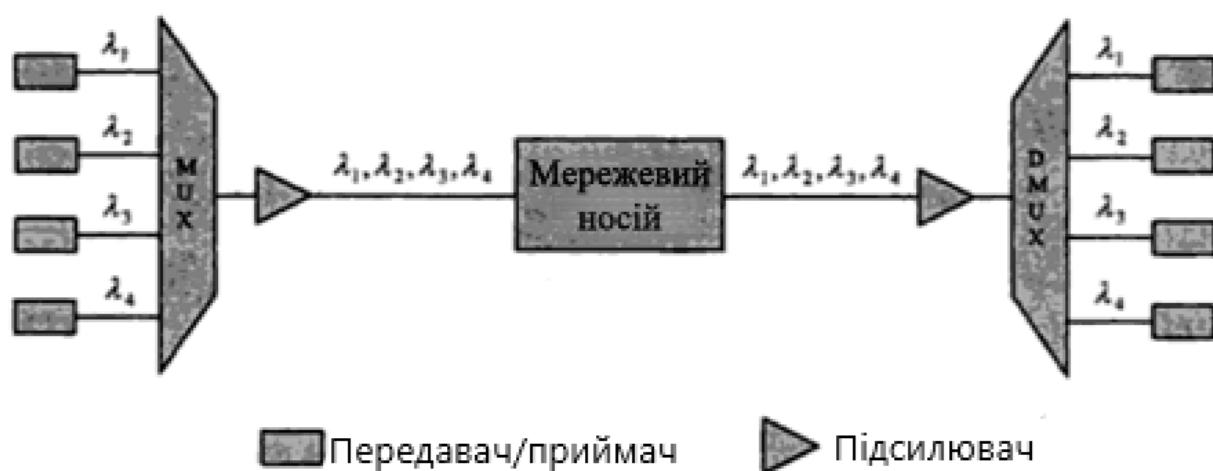


Рис. 3.1 — Система передачі WDM [5]

WDM еквівалентна призмі в принципі роботи. На рис. 3.1. показана блок-схема базової системи передачі WDM. Система WDM використовує мультиплексор на передавачі, щоб з'єднати кілька сигналів разом, і демультиплексор у приймачі, щоб розділити їх. При правильному типі волокна, можливо, мати пристрій, який працює і одночасно, і може функціонувати як оптичний мультиплексор з додаванням. Передавач складається з лазера і модулятора. Лазер — це джерело світла, яке генерує сигнал оптичного носія або з фіксованою довжиною хвилі, або з регульованою довжиною хвилі. У модуляторі сигнал несучої модулюється електронним сигналом і потім передається в мультиплексор (MUX). Мультиплексор об'єднує кілька оптичних сигналів на різних довжинах хвиль на вхідних портах в єдиний оптичний сигнал, який

передається в загальний вихідний порт або оптичне волокно. Демультимплексор (DMUX) використовує оптичні фільтри для поділу оптичного сигналу, прийнятого на вхідний порт, на кілька оптичних сигналів різної довжини хвилі, які потім надсилаються в приймач. Приймач складається з детектора (наприклад, фотодіоду), який може перетворити оптичний сигнал в електронний сигнал. Оптичні підсилювачі використовуються для підтримки сили потужності оптичного сигналу у відповідних місцях в системі передачі.

3.1.1. Застосування технології WDM

Перші системи WDM поєднували лише два сигнали. Сучасні системи можуть обробляти до 160 сигналів і, таким чином, розширювати основну систему 10 Гбіт/с через одну пару волокон до понад 1,6 Тбіт/с. Оскільки системи WDM можуть розширити потужність мережі та вмістити кілька поколінь розвитку технологій в оптичній інфраструктурі без необхідності капітального ремонту магістральної мережі, вони користуються популярністю у телекомунікаційних компаній. [2]

Застосування технології WDM дозволяє здавати в оренду не тільки оптичні кабелі або волокна, а й окремі довжини хвиль, тобто реалізувати концепцію «віртуального волокна». По одному волокну на різних довжинах хвиль можна одночасно передавати найрізноманітніші програми — кабельне телебачення, телефонію, трафік Інтернет, "відео на вимогу" і т.д. Як наслідок цього, частина волокон в оптичному кабелі можна використовувати для резерву. [7]

Спільне застосування технологій TDM і WDM дозволяє значно розширити спектр послуг, що надаються, залишаючи практично без змін більшу частину наявного обладнання. Застосування технології WDM дає численні переваги, однак вимагає високого рівня підготовки технічного персоналу і сучасного контрольно-вимірювального обладнання.

3.1.2. Розвиток WDM-системи

Потреба в збільшенні пропускної здатності мережі зв'язку подвоюється кожен рік, і цей темп навряд чи сповільниться в найближчі десять років. Крім того, ця потреба все більше поширюється географічно. Зниження цін постачальниками, ослаблення монопольних позицій держави в телекомунікаціях і зацікавленість до використання Інтернету призводять тільки до збільшення попиту на швидкість передачі. На сьогодні технологія DWDM забезпечує найшвидший і економічний ріст смуги пропускання, на практиці показуючи свою надійність. В багатьох випадках завдяки застосуванню технології DWDM пропускна здатність оптичної лінії зв'язку може бути збільшена в сотні разів.

Мабуть, технологія DWDM ще не скоро досягне своєї межі по пропускній здатності. В досвідчених системах вже досягнута передача декількох сотень каналів по одному оптичному волокні. Подальше зростання числа каналів можливо за рахунок зменшення спектральної відстані між ними, використання підсилювачів EDFA з більшою шириною спектра (наприклад, включаючи L-діапазон — від 1565 до 1625 нм), або за рахунок застосування спеціалізованих волокон, що дозволяють здійснювати передачу в діапазоні шириною до 1200 нм без додаткового посилення.

Вражаюче зростання пропускної здатності досягається при збільшенні швидкості передачі даних в кожному каналі. У сучасних цифрових системах передачі ця швидкість становить 2,5 Гбіт/с або 10 Гбіт/с. Були продемонстровані дослідні зразки систем зі швидкістю передачі 40 Гбіт/с на канал, причому вже можлива одночасна передача даних по 1921 каналах зі швидкістю 40 Гбіт/с в кожному. Це відповідає сумарній швидкості передачі понад 5 Тбіт/с (близько 1000 повних компакт-дисків в секунду) по одному волокну. Попит на передачу Інтернетом аудіо та відео в реальному часі, без сумніву, буде сприяти широкому застосуванню систем DWDM і зниження їх вартості. [2]

3.2. DWDM

Системи WDM поділяються за довжиною хвилі на CWDM та DWDM. CWDM працює з 8 каналами (тобто, 8 волоконно-оптичних кабелів) у так С-діапазоні з довжиною хвилі близько 1550 нм. DWDM також працює в С-діапазоні, але з 40 каналами при інтервалі 100 ГГц або 80 каналами при інтервалі 50 ГГц.

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) — технологія для досягнення надзвичайно високих швидкостей передачі даних по волоконно-оптичному кабелю. DWDM модулює декілька каналів даних в оптичні сигнали, що мають різну частоту, а потім мультиплексує ці сигнали в єдиний потік світла, який надсилається по волоконно-оптичному кабелю (рис. 3.2.). DWDM дозволяє величезній кількості даних пройти по одному мережевому каналу. Оскільки вони переносяться на різній довжині хвилі, канали не заважають один одному, отже, зберігається цілісність даних. [3]

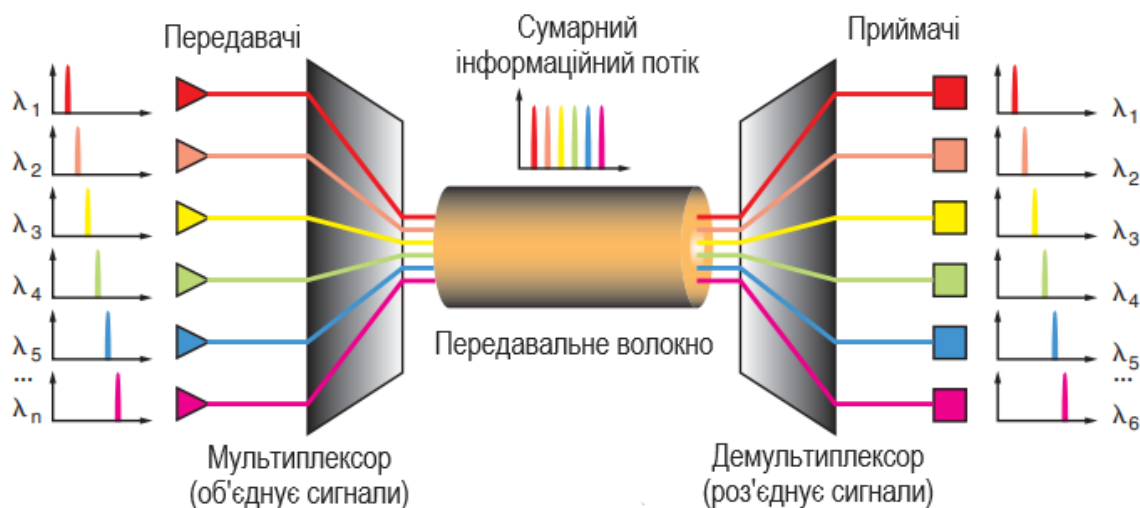


Рис. 3.2 — Схематичне зображення DWDM системи [3]

Через свою здатність обробляти стільки даних, DWDM користується популярністю у телекомунікаційних та кабельних компаній і є невід'ємною частиною їх основних мереж. Оператори зв'язку можуть збільшити пропускну

здатність своїх волокон без серйозних капіталовкладень, пов'язаних з будівництвом або орендою (лізингом) нових волокон. [5]

Основна вимога до компонентів систем DWDM полягає в тому, що вони повинні однаково обробляти всі канали на всьому протязі оптичного шляху лінії зв'язку. Для цього потрібен ретельний вибір оптичних передавачів, мультиплексорів, демультимплексорів, підсилювачів і волокон. Всі оптичні характеристики пасивних і активних компонентів мережі — вносять втрати, втрати на відбиття, дисперсія, поляризаційні ефекти і т.д., повинні вимірюватися як функція довжини хвилі у всьому діапазоні довжин хвиль, що використовується для передачі в системі DWDM. У системах DWDM часто використовують значно складніші пристрої, ніж в системах з однієї робочої довжиною хвилі, і проводити тестування характеристик таких пристроїв набагато складніше.

3.3. Спектральні області в DWDM-системах

Області спектра поблизу третього вікна прозорості кварцового волокна (1550 нм) розбиті на три спектральні діапазони: S-область (1485-1520 нм), C-область (1530-1562 нм) і L-область (1570-1610 нм).

3.3.1. S-область

Короткохвильова (S - short, «коротка») область DWDM-передачі, що займає інтервал від 1485 до 1520 нм. При додаванні «S +» області це спектральне вікно можна розширити в область < 1485 нм. Переваги S-області: низька сприйнятливості до втрат через мікро вигини волокна, найнижча дисперсія для волокна SSMF. Пропускна здатність: S-область має спектральну ширину, близьку за величиною до C-області, і, відповідно, порівняну пропускну здатність.

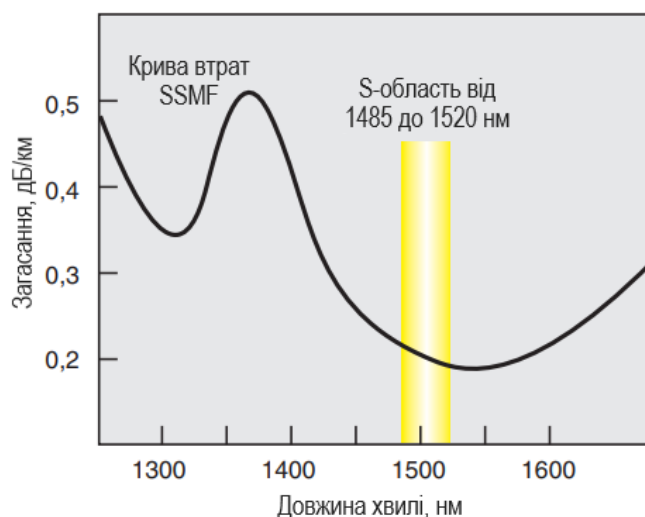


Рис. 3.3 — S-область [3]

3.3.2. C-область

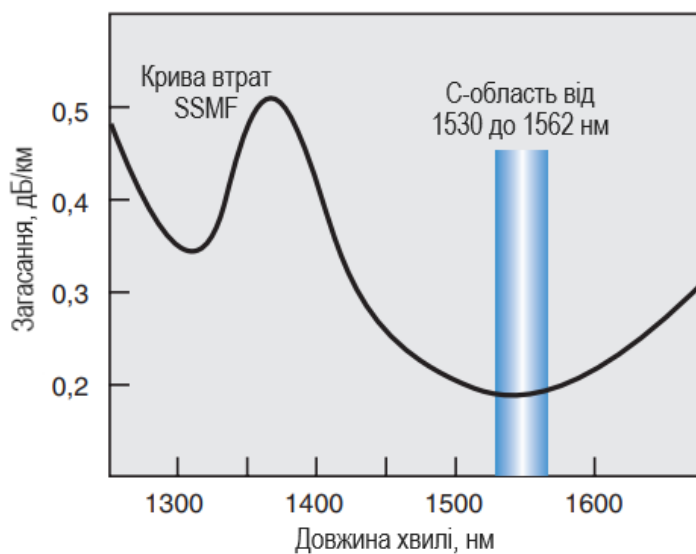


Рис. 3.4 — C-область [3]

Центральна і традиційна (C — conventional) область DWDM-передачі, що займає інтервал від 1530 до 1562 нм. Все DWDM-системи, введені в експлуатацію до 2000 року, працювали в C-області. Переваги C-області: найменші втрати для SSMF волокна, низька сприйнятливість до втрат через мікро вигинів волокна,

ербієві підсилювачі працюють в С-області. Пропускна здатність С-області у відповідності зі стандартами ITU визначені наступні частотні інтервали між каналами: 50 ГГц, 100 ГГц, 200 ГГц. Кількість каналів для С-області в реальних DWDM-системах становить від 16 до 96.

3.3.3. L-область

Довгохвильова (L — long, «довга») область DWDM передачі, що займає інтервал від 1570 до 1610 нм. Переваги: EDFA можуть працювати в L-області. Пропускна здатність L-області має спектральну ширину, близьку за величиною до С-області, і, відповідно, порівняну пропускну здатність.

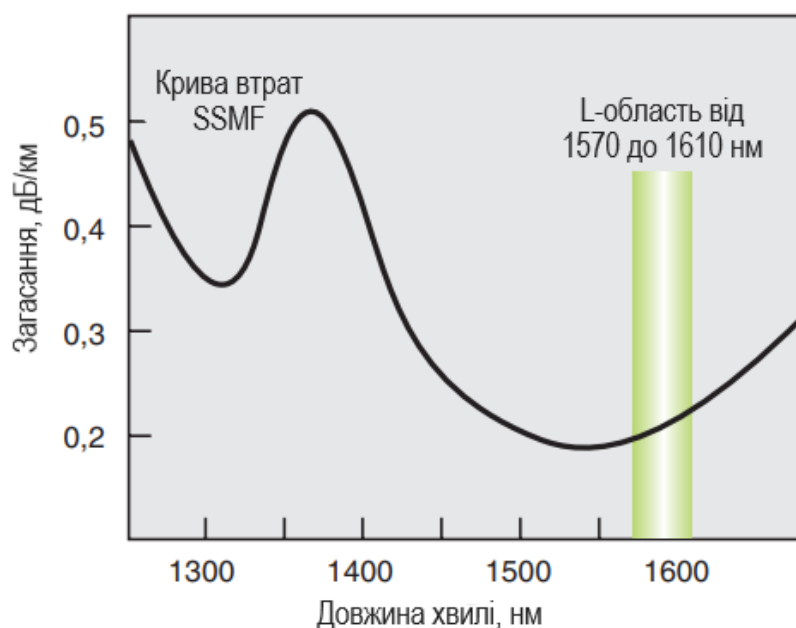


Рис. 3.5 — L-область [3]

3.4. Спотворення сигналів в DWDM-системі

Показник заломлення волокна залежить від інтенсивності оптичного сигналу (ефект Керра), що призводить до залежності набігу фази від інтенсивності. Фазова само модуляція (ФСМ) призводить до частотного зсуву на передньому і задньому фронті спектра імпульсу (рис. 3.6.), так як в цих областях

інтенсивність, а значить, і набіг фаз змінюються. У присутності дисперсії цей частотний зсув може привести до звуження, розширення або іншому спотворенню форми імпульсу.

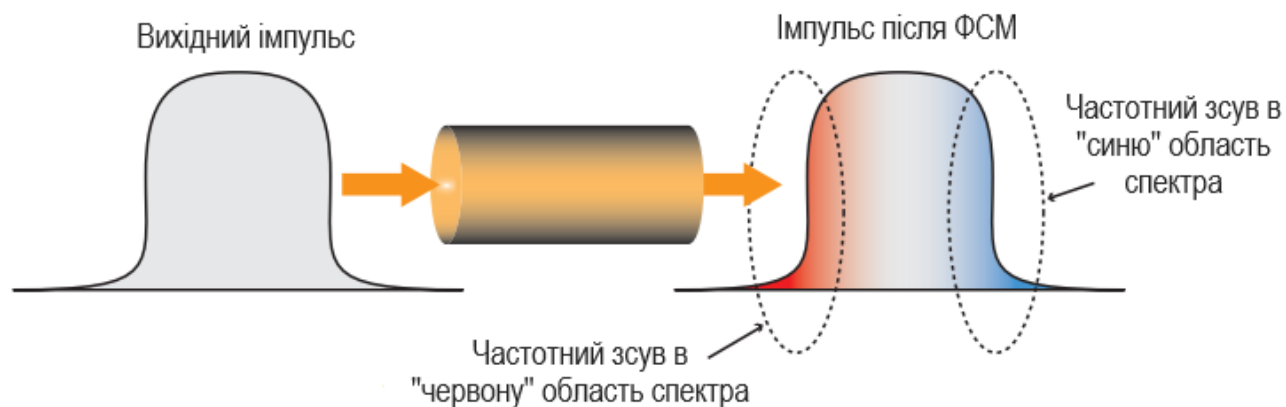


Рис. 3.6 — Частотні зрушення на передньому і задньому фронтах імпульсу внаслідок ФСМ [3]

В одномодовому волокні насправді поширюються дві моди з ортогональними поляризаціями. Ці поляризації називаються власними станами поляризації (ВСП). Наприклад, в волокні який зберігає поляризацію ВСП збігаються з осями двоприменезаломлення. У передавальному волокні двоприменезаломлення змінюється складним чином під дією випадкових факторів (неідеальної кругової симетрії серцевини волокна, мікро вигинів, умов навколишнього середовища), тому напрямок ВСП також випадковим чином змінюється уздовж волокна. Різниця швидкостей поширення світлових імпульсів, поляризованих вздовж швидкої і повільної осі ВСП (тобто швидкостей двох поляризованих мод) призводить до відставання однієї моди від іншого — до різниці групових затримок (РГЗ) між модами (рис. 3.7.). Усереднене значення РГЗ і є поляризаційна модів дисперсія (ПМД). [3]

ПМД приводить до розширення імпульсу, що підвищує ймовірність помилок при розпізнаванні сигналу. ПМД — основний фактор, що обмежує дальність передачі при високих швидкостях передачі (10 Гбіт/с і вище). Важко

ослабляти ефект ПДМ тому, що умови навколишнього середовища (температура, вібрації), які призводять до випадкових змін напрямку ВСП вздовж передавального волокна, самі випадковим чином змінюються з часом.

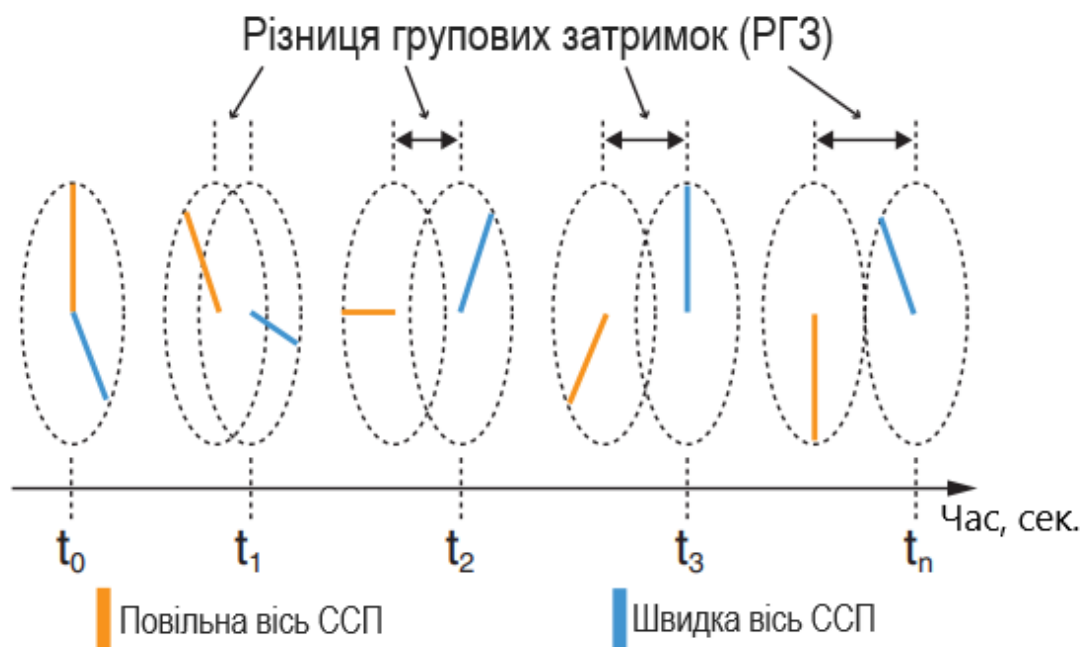


Рис. 3.7 — Зміна напрямку ВСП уздовж волокна. Різниця групових затримок (РГЗ) [3]

Хроматична дисперсія (ДП) — це розширення форми сигналу при його поширенні в волокні через відмінності групових швидкостей його спектральних складових. Внесок в хроматичну дисперсію вносять два механізми: матеріальна дисперсія і хвильова дисперсія. Дисперсія матеріалу виникає внаслідок того, що показник заломлення матеріалу волокна (кварцового скла) змінюється в залежності від довжини хвилі оптичного випромінювання. Хвильова дисперсія — це залежність затримки світлового імпульсу від довжини хвилі, пов'язана зі зміною швидкості його поширення в волокні через хвильовий характер поширення. [3]

Дисперсійні характеристики волокна залежать від його типу. У деяких волокнах коротші довжини хвиль можуть відставати від більш довгих (це означає,

що волокно має від'ємне значення дисперсії), в інших волокнах все може бути навпаки. Хроматичну дисперсію можна компенсувати, додаючи в лінію блок компенсації дисперсії (DCU).

Чотирьох хвильове зміщення (ЧХЗ) проявляється у взаємодії сусідніх каналів в WDM-системах, що призводить до появи паразитних (комбінаційних) піків, які, в свою чергу, викликають перехресні перешкоди в сусідніх каналах (рис. 3.8.).

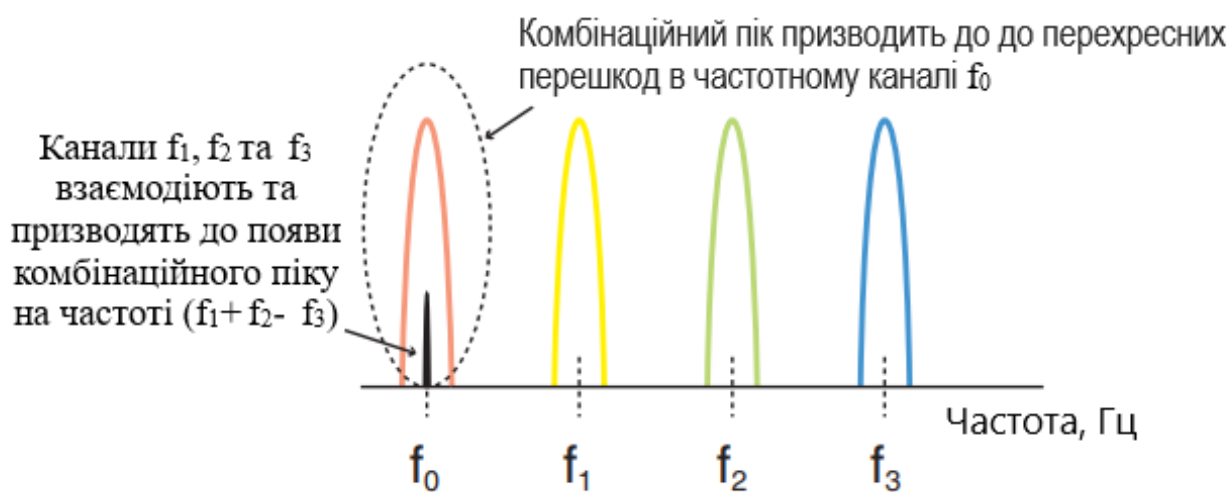


Рис. 3.8 — Прояв ефекту ЧХЗ [3]

При взаємодії каналів комбінаційні піки з'являються на відстанях, залежних від частот цих каналів. При зменшенні відстані між каналами ефект посилюється. Чотирьох хвильове зміщення також збільшується при підвищенні потужності сигналу. Хроматична дисперсія в сигналі зменшує ефект ЧХЗ. Тому він особливо сильно проявляється поблизу нульової дисперсії волокна.

Вимушене комбінаційне (раманівське) розсіювання (ВКР) проявляється в перекачуванні потужності від сигналу з меншою довжиною хвилі до сигналу з більшою довжиною хвилі. Взаємодія світлових хвиль з коливними молекулами кварцу призводить до їх розсіювання, при якому енергія переходить від однієї хвилі до іншої. Ефективність процесу збільшується з ростом потужності,

залежить від різниці частот і досягає максимального значення при різниці частот 13,2 ТГц. ВКР призводить до перехресним перешкодам між каналами, і, що особливо важливо, до нерівномірного розподілу потужності по частотному діапазону DWDM-системи: на одному кінці частотного інтервалу (в «червоній» області) канали посилюються більше, ніж потрібно, а на іншому кінці спектру (в «синій» області) — навпаки, швидше «виснажуються». [3]

Фазова крос-модуляція (ФКМ), показник заломлення волокна залежить від інтенсивності оптичного сигналу (ефект Керра). При поширенні різних каналів по одному волокну зміни показника заломлення, викликані пучком одного каналу, можуть створювати залежні від часу фазові зрушення в сусідніх каналах. Змінюються в часі фазові зрушення рівносильні частотним зрушенням, таким чином, в спектр відчуває дію ефекту ФКМ-каналу і змінюється «колір».

3.5. Мультиплексори і демюльтиплексори

DWDM-демультиплексор просторово об'єднує різні оптичні сигнали, що прийшли з різних волокон, в один сумарний інформаційний потік для передачі по одному оптичному волокну. Зазвичай DWDM-мультиплексори підтримують частотний план ITU з відстанню між каналами 100 ГГц і 50 ГГц.

DWDM-демультиплексор просторово розділяє сигнали, які входили в сумарний інформаційний потік.

Технології, що застосовуються при створенні Mux/Demux:

1. Тонкі плівкові світлофільтри;
2. Волоконні бреггівські решітки;
3. Дифракційні решітки;
4. Решітки на основі масиву хвилеводів;
5. Біконічні розгалужувачі.

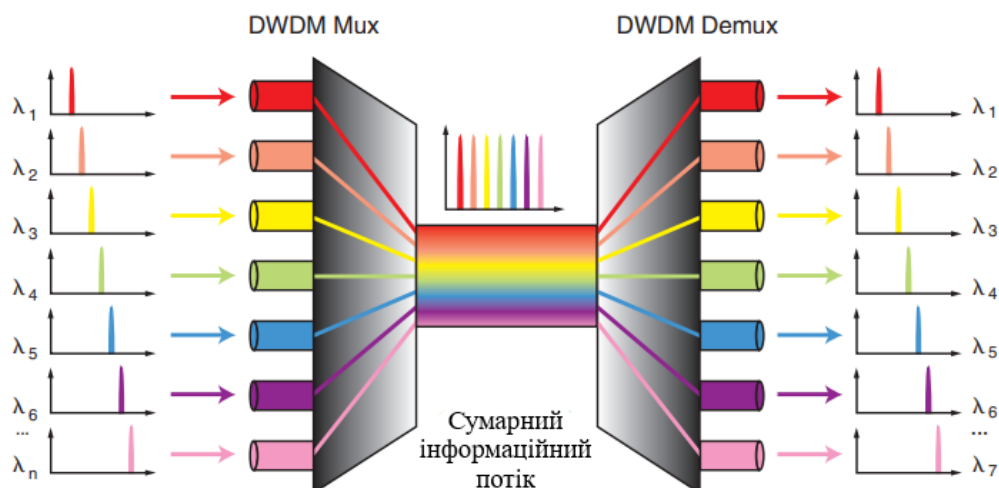


Рис. 3.9 — Схема мультиплексування/демультиплексування каналів в DWDM-системі [3]

3.5.1. Оптичний мультиплексор введення/виведення OADM

OADM додає або виводить з сумарного багатоканального інформаційного потоку окремі частотні канали прямо в лінії зв'язку, виконуючи функцію вводу-виводу на оптичному рівні (рис. 3.10.). До появи OADM для доступу до окремої довжини хвилі в лінії потрібно два послідовних DWDM-термінали. Більшість сучасних OADM додають або виводять конкретні канали, в той час як OADM нового покоління дозволяють здійснювати селективне введення-виведення. [3]

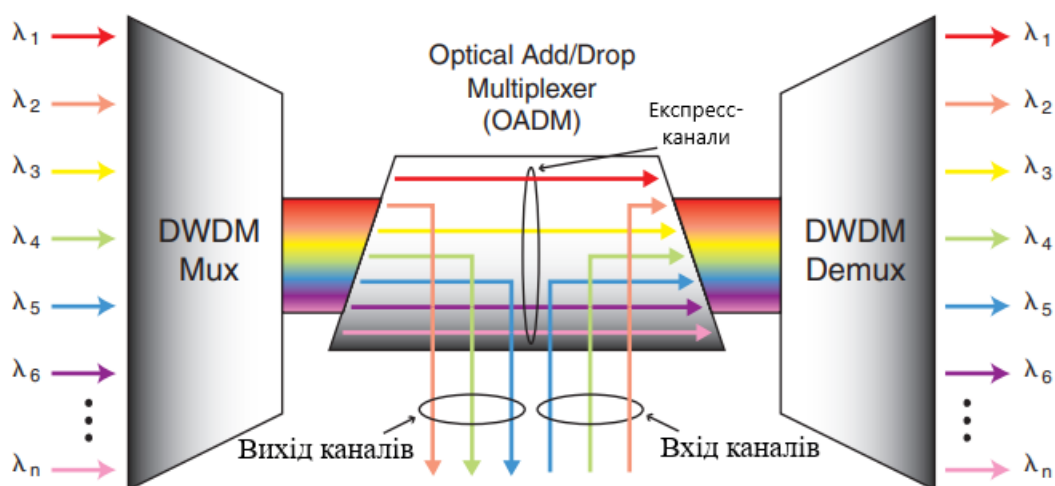


Рис. 3.10 — Схема мультиплексора ввода/выводу [3]

3.6. Оптичний модуль або трансивер та його типи

Це пристрій, що використовується в мережевому обладнанні для прийому і передачі даних між віддаленими пристроями: комутаторами, маршрутизаторами, мультиплексорами і іншим телекомунікаційним обладнанням, шляхом перетворення сигналу, що передається з оптичного в електричний і назад.

3.6.1. XFP

XFP означає «10-гігабітний малий форм-фактор, що підключається» використовується з оптоволоконним кабелем для високошвидкісної мережі. Приймач не залежить від протоколу і працює на оптичних хвилях, що відповідають 850 нм, 1310 нм або 1550 нм. Модулі XFP здатні функціонувати за допомогою методів мультиплексування з роздільною довжиною хвилі або щільною хвилею та можуть бути замінені «гарячими модулями», це означає, що функція заміни компонентів комп'ютерної системи може виконуватися без вимкнення системи. [18]

3.6.2. SFP+

SFP+ є багатоцільовим оптичними модулями для додатків передачі даних 10G на 850нм, 1310нм і 1550нм. Крім того, SFP+ модуль має ряд очевидних переваг, таких як більш висока швидкість, більш низьке енергоспоживання і більш низька вартість побудови системи і так далі. Це популярний галузевий формат, підтримуваний багатьма постачальниками мережевих компонентів. SFP + модулі менші, ніж XFP, але обидва вони є вдосконаленими версіями SFP. [18]

3.6.3. SFP

SFP (Small Form-factor Pluggable — компактний змінний форм-фактор) — компактний оптичний трансивер, який використовується для двобічної передачі

даних по одному або двом одномодовим або багатомодовим оптичним волокнам. Приймачі SFP в основному використовуються в телекомунікаціях та передачі даних. Ці модулі можуть зв'язувати обладнання, як маршрутизатори та комутатори.

3.7. Оптичне підсилення

Загасання світла в волокні обмежує дальність передачі відстанню, на якому рівень сигналу падає нижче рівня чутливості приймача. Посилення дозволяє збільшити дальність передачі (рис. 3.11.). На жаль, підсилювачі при цьому збільшують шум і різні спотворення імпульсу. Підсилювач потужності (бустер) встановлюється відразу після передавача (наприклад, лазерного діода) і призначений для додаткового посилення сигналу, що передається.

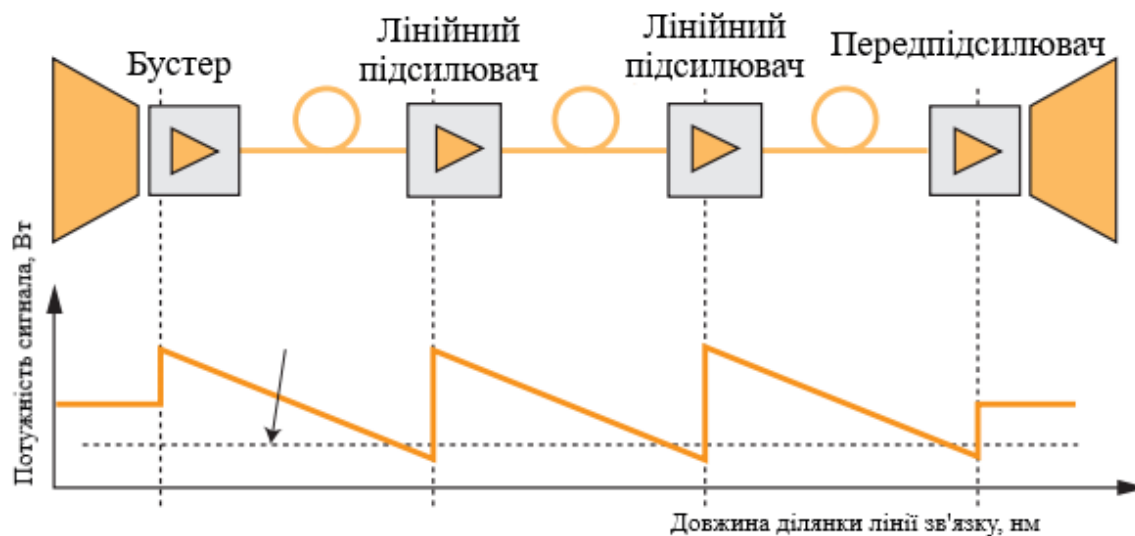


Рис. 3.11 — Посилення сигналу в DWDM-лінії зв'язку [3]

Лінійний підсилювач встановлюється в проміжних точках лінії зв'язку, приблизно через кожні 80-100 км, потрібен для посилення сигналу, ослабленого через загасання в оптоволокні або інших компонентах лінії. ІЛА працює з сигналом тільки в оптичному діапазоні і виконує тільки одну «відновлюючу дію» (1R) — посилення. Передпідсилювач встановлюється безпосередньо перед

приймачем для посилення сигналу до рівня, що входить в діапазон чутливості приймача. [3]

Стандартні типи підсилювачів:

1. Ербієві волоконні підсилювачі (EDFA — erbium doped fiber amplifiers);
2. Раманівські (ВКР) волоконні підсилювачі (ВКР — вимушене комбінаційне розсіювання);
3. Напівпровідникові оптичні підсилювачі (SOA — semiconductor optical amplifiers).

3.7.1. Ербієвий волоконний підсилювач

Переваги ербієвих волоконних підсилювачів: ефективне накачування, мінімальна залежність від поляризації, висока вихідна потужність, низький рівень шуму, мінімальні спотворення і перехресні перешкоди.

Недоліки ербієво волоконних підсилювачів: працюють тільки в С- і L-областях, менш ефективні ніж раманівські підсилювачі, при великій потужності накачування (при використанні великої кількості каналів).

Джерелом накачування зазвичай служить лазер, який випромінює на довжині хвилі 980 або 1480 нм. Одномодове волокно, леговане іонами ербію, служить активним середовищем, перетворювачем випромінювання накачування в випромінювання на частоті сигнальної хвилі. Селективний хвильовий з'єднувач вводить випромінювання лазера накачування з довжиною хвилі 980 або 1480 нм в активне волокно, при цьому вносить мінімальне загасання сигналу. Ізолятор пропускає випромінювання, що розповсюджується в прямому напрямку (напрямку поширення сигналу) і перешкоджає поширенню світла в зустрічному напрямку. Зокрема, вихідний ізолятор перешкоджає попаданню в підсилювач випромінювання, відбитого від зовнішніх елементів лінії зв'язку. [3]

3.7.2. Раманівський оптичний підсилювач

Раманівське підсилювачі побудовані на ефекті вимушеного комбінаційного розсіювання, при якому потужність накачування перетворюється у випромінювання на частоті сигнальної хвилі.

Переваги рамановських підсилювачів: широкий спектр посилення, що дозволяє застосовувати раманівське підсилювачі в C-, L- і S-областях, раманівське посилення можна отримати в стандартних волокнах, більша, ніж у EDFA, ефективність при великих потужностях накачування (можливість застосування при більшій кількості каналів).

Недоліки рамановських підсилювачів: менша, ніж у EDFA, ефективність при менших потужностях накачування (незручність застосування при невеликому числі каналів). [3]

3.7.3. Напівпровідниковий оптичний підсилювач

Як і в напівпровідниковому лазері, в SOA накачування активного середовища створюється інжекцією носіїв заряду в робочу область. Для запобігання виникнення паразитної генерації на торці активного елементу наносять антивідбивне покриття.

Переваги напівпровідникових підсилювачів: підсилювач являє собою маленьке напівпровідниковий пристрій, що дозволяє інтегрувати його в інші елементи і робить можливим його масове виробництво, широкий спектр посилення.

Недоліки напівпровідникових підсилювачів: великий рівень шуму в порівнянні з ербієвим або раманівським підсилювачами, низька вихідна потужність, великі перехресні перешкоди між каналами, чутливість до поляризації падаючого світла, великі вносяться втрати, труднощі з'єднання SOA з передавальним волокном. [3]

3.8. Повторювач

Оптичний підсилювач виробляє одну «відновлюючу дію» (1R) (рис. 3.12.) по відношенню до сигналу — посилення, в процесі якого посилюється також і шум. На кожній ділянці лінії після підсилювача посилений шум підсумовується, що призводить до погіршення відношення сигнал/шум і, відповідно, до погіршення якості сигналу. Після того як сигнал пройшов через кілька підсилювачів (їх кількість визначається при проектуванні конкретної лінії зв'язку), потрібно регенератор для відновлення первісної форми сигналу. Регенератор виробляє потрібну «відновлюючу дію» (3R) по відношенню до сигналу: відновлення форми, відновлення синхронізації і посилення. При використанні сучасних технологій ця потрібна дія здійснюється оптоелектрооптичним перетворенням. Можливо, в майбутньому це можна буде зробити повністю оптичним шляхом. [3]

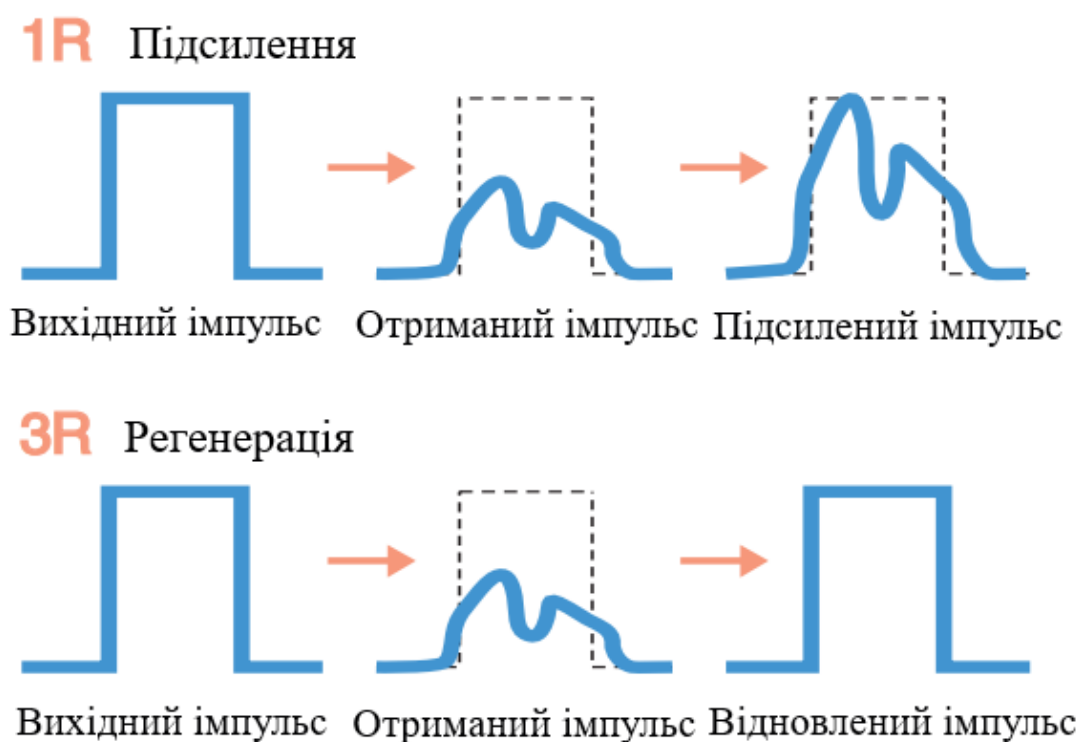


Рис. 3.12 — Посилення і регенерація імпульсів [3]

3.9. Основні фактори роботи DWDM-системи

3.9.1. Вихідна потужність підсилювача

Підвищення потужності підсилювача дозволяє збільшити відстань між лінійними підсилювачами (ILAs — in-line amplifiers) за рахунок збільшення відносини сигнал/шум. Однак посилення нелінійних спотворень сигналу накладає обмеження на максимальне значення вихідної потужності підсилювача. [3]

3.9.2. Відстань між підсилювачами

Менша відстань між лінійними підсилювачами (ILAs) дозволяє зменшити необхідну вихідну потужність підсилювачів, підвищуючи тим самим стійкість сигналів до нелінійних ефектів.

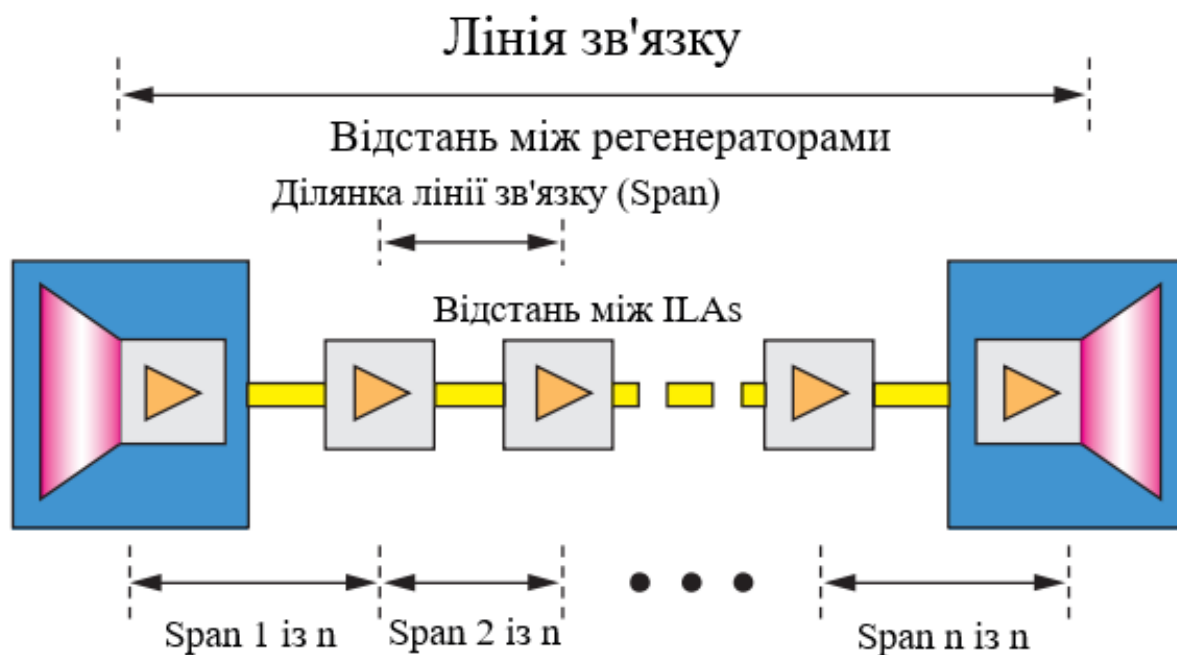


Рис. 3.13 — Розташування лінійних підсилювачів між регенераціями в DWDM-лінії зв'язку [3]

3.9.3. Тип волокна

Нове покоління оптичних волокон володіє значно меншими втратами, ніж старе, тому сигнали можна передавати на великі відстані, не підвищуючи при цьому вихідну потужність підсилювачів. Крім того, при виборі типу волокон необхідно враховувати, що різні волокна володіють різною дисперсією і різними нелінійними властивостями.

3.9.4. Число каналів

Збільшення числа каналів підвищує пропускну здатність мережі, при цьому посилення сигналів, які передаються по кожному каналу, має бути приблизно однаковим. Це означає, що збільшення числа каналів вимагає збільшення необхідної сумарної потужності підсилювача. [3]

3.9.5. Швидкість передачі на канал (канальна швидкість)

Збільшення канальної швидкості також призводить до збільшення пропускну здатності лінії. Але спотворення сигналів в DWDM-лінії, наприклад внаслідок поляризаційної модової дисперсії (ПМД), сильніше позначається на якості зв'язку при великих швидкостях передачі.

4. РАМАНІВСЬКІ ПІДСИЛЮВАЧІ

4.1. Вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР)

Результат взаємодії в нелінійному середовищі між світловим випромінюванням і флуктуаціями поляризації середовища, викликаними коливаннями заряджених частинок. Така взаємодія призводить до обміну енергією між пучком і середовищем, і до виникнення або посилення розсіяних світлових хвиль. Якщо інтенсивність світлової хвилі невелика, то її впливом на колювання середовища можна знехтувати. В цьому випадку розсіювання відбувається на хаотичних теплових коливаннях заряджених частинок, і дане явище називається спонтанним комбінаційним розсіюванням світла (КРС).

В кварцовому волокні теплові колювання іонів Si і O на частоті Ω_{AK} призводять до модуляції поляризації середовища на комбінаціях частот, рівних $\omega \pm \Omega_{AK}$, де ω — частота світлової хвилі накачування. Внаслідок цього виникає випромінювання на комбінаційних частотах $\omega - \Omega_{AK}$ (стоксіва компонента) і $\omega + \Omega_{AK}$ (антистоксіва компонента). Мовою енергії фотонів стоксіва компонента відповідає розсіюванню з втратою енергії фотонами, а антистоксіва компонента — розсіювання з ростом енергії фотонів. Зрушення стоксівої і антистоксівої компоненти по довжині хвилі розрізняються і залежать від довжини хвилі накачування. У кварцових волокнах ВРХ викликає зрушення частоти сигналу на величину приблизно ± 13 ТГц від частоти хвилі накачування, що відповідає зрушення довжини хвилі приблизно на -90 і +85 нм для накачування на довжині хвилі 1480 нм. [4]

При вимушеному комбінаційному розсіюванні в оптичному волокні падаюча електромагнітна хвиля досить великої потужності (хвиля накачування), взаємодіючи з сигнальною хвилею, когерентно збуджує коливальну моду молекули кварцу (SiO_2). У процесі поширення по волокну енергія випромінювання накачування перетвориться в енергію пружних колювань

молекул середовища і в енергію сигнальної хвилі. Сигнальна хвиля, навпаки, посилюється за рахунок енергії хвилі накачування (рис. 4.2.).

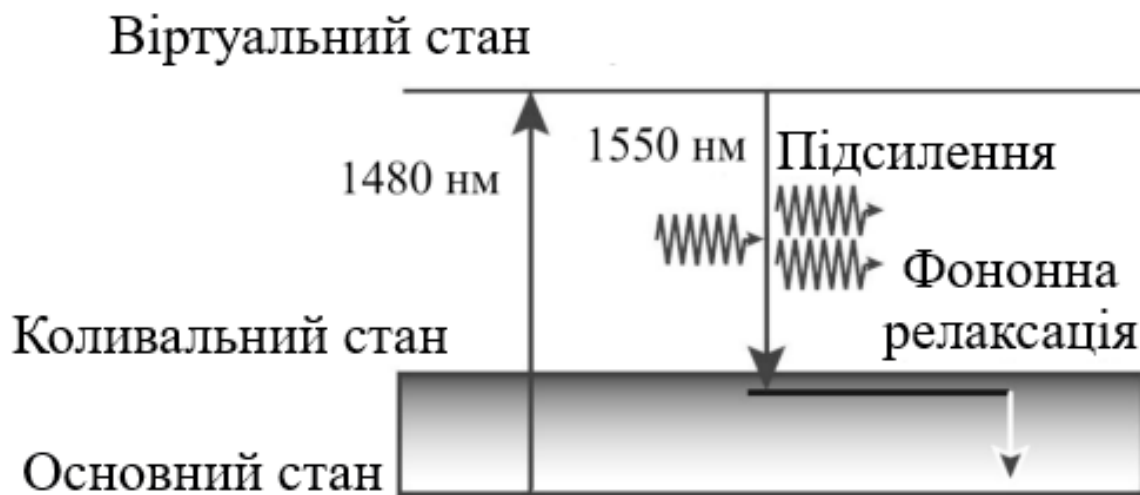


Рис. 4.1 — Механізм ВКР [4]

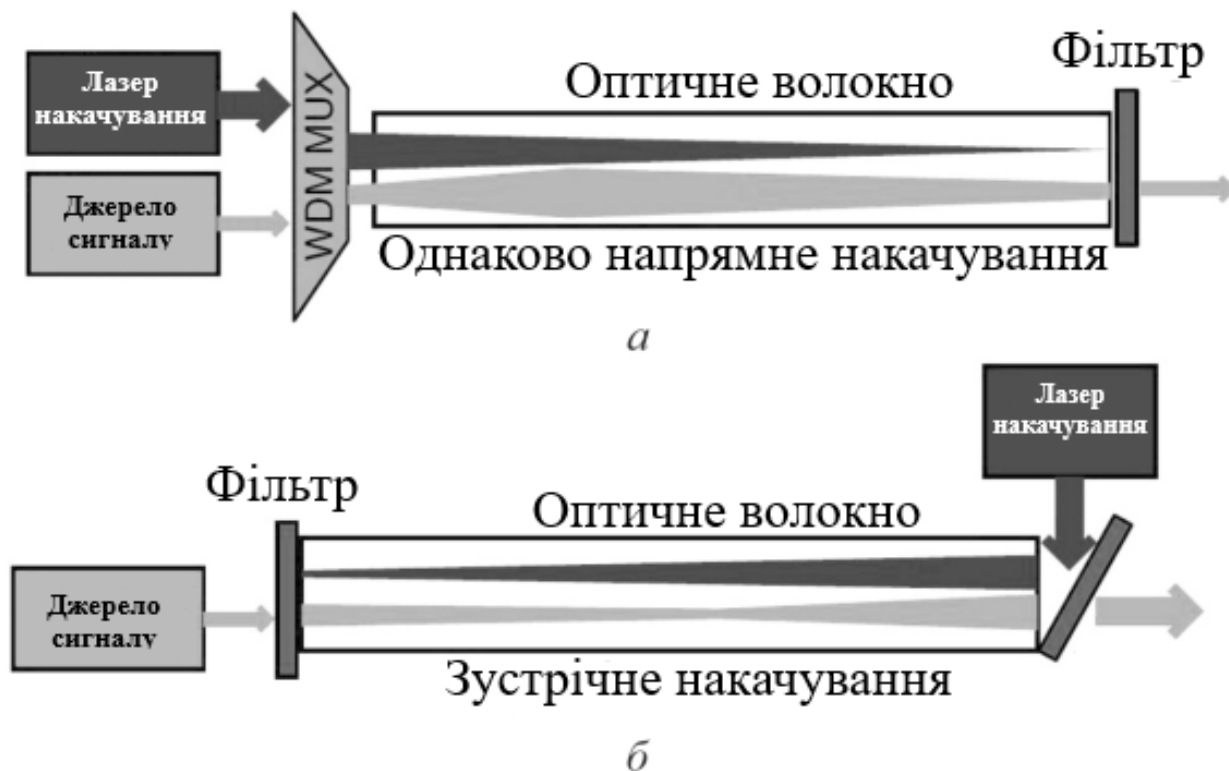


Рис. 4.2 — Оптичні схеми ВКР-підсилювачів однаково напрямним (а) і зустрічній (б) накачуваннями [4]

4.2. Коефіцієнт підсилення

4.2.1. Коефіцієнт підсилення слабкого сигналу ВКР-підсилювачем (ON/OFF-підсилення)

Коефіцієнт підсилення слабкого сигналу в процесі ВКР в телекомунікаційному волокні визначають наступним виразом (1):

$$G_R(\lambda, L) \equiv \frac{P_S(L)}{P_S(0) \exp(-\alpha_S L)} = \exp \int_0^L g_R(\lambda) k_{\text{pol}} P_P(z) dz,$$

де $P_P(z)$ — залежність потужності накачування від координати вздовж осі підсилювача; $P_S(0)$ — потужність сигналу на вході в підсилювач; $P_S(L)$ — потужність сигналу на виході з підсилювача; $g_R(\lambda)$ — коефіцієнт комбінаційного підсилення, що залежить від характеристик волокна; k_{pol} — коефіцієнт, що залежить від поляризації сигналу і накачування ($k_{\text{pol}} = 1$ при співпадаючих поляризаціях і $k_{\text{pol}} = 0,5$ для повністю деполаризованого накачування; для ортогональних поляризацій $k_{\text{pol}} \ll 1$). [4]

Оскільки $G_R(\lambda, L)$ — це відношення потужності сигналу на виході волокна при включеному підсилювачі до потужності сигналу на виході при вимкненому ВКР-підсилювачі, його називають ON/OFF-підсиленням.

4.2.2. Коефіцієнт підсилення з урахуванням насичення

У загальному випадку, коли впливом підсилюваного сигналу на накачування нехтувати не можна, необхідно описувати одночасно еволюцію сигналу і накачування за допомогою наступної системи пов'язаних рівнянь (2 та 3):

$$\frac{dP_S}{dz} = -\alpha_S P_S + g_R k_{\text{pol}} P_P P_S ,$$

$$\frac{dP_P}{dz} = -\alpha_P P_P - \frac{v_P}{v_S} g_R k_{\text{pol}} P_P P_S ,$$

, де

P_P і P_S — середні потужності сигнальної хвилі і хвилі накачування. Система рівнянь (2), (3) може бути вирішена аналітично, якщо знехтувати виснаженням потужності випромінювання накачування. Це рішення коректно тільки для випадку, коли P_S відносно невелика і довжина взаємодії відносно мала.

Припускаючи, що випромінювання накачування не забракне, для потужності випромінювання накачування маємо (4):

$$P_P(z) = P_P(0) \exp(-\alpha_P z) .$$

Підставляючи (4) в рівняння (2), легко отримати вираз (1). У загальному випадку необхідно вирішувати рівняння (2), (3) чисельно. [4]

4.3. Переваги та недоліки підсилювача

Ці підсилювачі перспективні в силу наступних принципових переваг:

1. Існує в волокнах будь-якого типу, тому активним середовищем підсилювача може бути волокно для передачі оптичного сигналу або використовується в компенсаторах дисперсії.

2. Підсилення не прив'язане до резонансних спектрів домішок і може бути отримано практично на будь-якій довжині хвилі в області прозорості при наявності джерела в потрібному спектральному діапазоні.

3. Спектр посилення залежить від спектра накачування, тому підбір форми спектра поліхроматичного накачування дозволяє формувати дуже широку (понад 100 нм) смугу посилення з низькою нерівномірністю контуру посилення.

4. Низький рівень шумів і розподіл посилення при зустрічному накачуванні, коли випромінювання накачування поширюється назустріч сигналу.

Однак ряд недоліків підсилювачів на першому етапі перешкоджає їх практичному застосуванню.

Вагомий недолік — відносно низька ефективність накачування в порівнянні з ербієвими підсилювачами (EDFA) для сигналів малої потужності.

Другий недолік полягає в тому, що для підсилення потрібні довгі відрізки волокна. Але цей недолік може стати перевагою, якщо ВКР-підсилювач суміщений з передавальним телекомунікаційним волокном або з волоконним компенсатором дисперсії.

Третя вада підсилювачів пов'язана з їх швидким тимчасовим відгуком, що призводить до трансформації шумів накачування в шуми підсилення сигналу. Четвертий недолік — наявність надлишкових шумів, пов'язаних з подвійним релєївським розсіюванням. П'ятий недолік пов'язаний з наявністю нелінійних спотворень в підсилювачі при підсиленні сигналів безлічі каналів WDM.

Так як вагомим недоліком раманівських підсилювачів є їх невисока ефективність перетворення, що вимагає використання досить потужного безперервного випромінювання накачування (~ 1 Вт) для отримання типової для оптичних систем зв'язку величини посилення сигналу 30 дБ. Однак в ході наукових досліджень було зареєстровано посилення сигналу від напівпровідникового лазера з довжиною хвилі 1,24 мкм на 45 дБ в світоводі довжиною 2,4 км. [4]

5. РОЗРАХУНОК ВОЛЗ ТИПУ «NOTHING IN LINE» (NIL)

В даній дипломній роботі було обрано маршрут для ВОЛЗ типу NIL між містами в Україні — Миколаїв (Миколаївська область) та Кременчук (Полтавська область) через Кропивницький (Кіровоградська область). Загальна протяжність складає 324 км. Ознайомившись з усіма операторами ВОЛЗ в Україні було виявлено, що цей маршрут ще не розвіданий, тому він є актуальним в даній дипломній роботі.

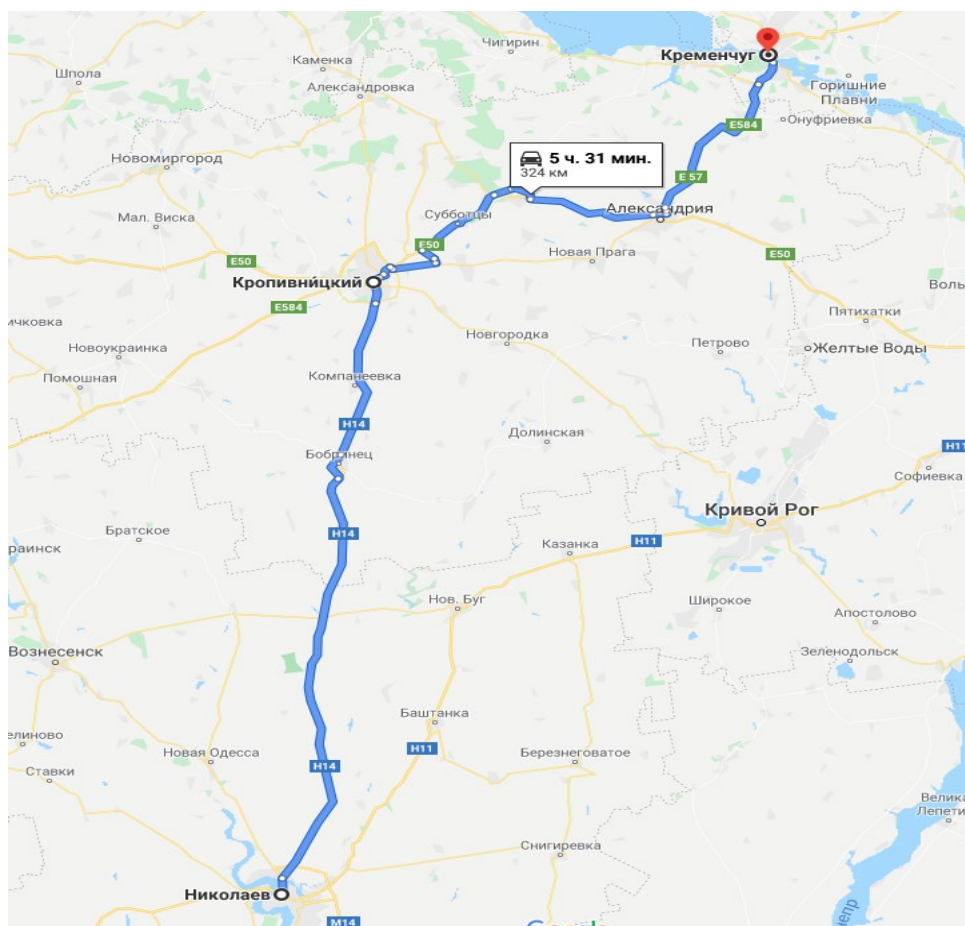


Рис. 5.1 — Схема ВОЛЗ [19]

Будемо прокладувати ВОЛЗ поряд з автомагістраллю, так як це робить одна з провідних компаній по ВОЛЗ в Україні — Atrasom. Є три варіанти маршруту: через місто Кропивницький, через поля (без проміжного пункту) і через місто Кривий Ріг. Варіант, який вибраний в даній дипломній роботі є найкращим з

наступних причин: ВОЛЗ біля автомобільних магістралей, цінять оператори мобільного зв'язку, а також оператори передачі даних; прокладання через поля можливо і затрати по кабелю менші, але надійність підпадає під сумніви, адже ніколи не знаєш, хто і коли почне технічні роботи на лініях; простіші в обслуговуванні. Третій варіант хороший тільки на 50%, так як до Кривого Рогу є можливість прокласти кабелю біля автомагістралі, а після Кривого Рогу вже ні — тому і цей варіант відпадає.

Підберемо необхідне обладнання системи.

5.1. Вибір обладнання

5.1.1. Оптичний кабель

Вибір оптичного кабелю впливає з вибору технології його прокладання. В даній дипломній роботі прокладання кабелю буде з за допомогою гофротруби, Вибір технології за допомогою гофротруби обґрунтований тим, що кабель замовляють в котушках, де на одну котушку може намотатися як 3 км кабелю так і 40 км, все це залежить від товщини кабеля. Відповідно чим товще кабель тим більше котушок нам потрібно, а це погано. Наприклад, ми обрали технологію прокладки кабелю в ґрунт, тут товщина кабелю є на порядки більшою за рахунок допоміжних захисних шарів від гризунів, води і тд., тому котушки будуть по 3 км, це означає, що кожні 3 км на кабелі буде технологічний зварний стик, де зварюють волокна від різних шматків, на це місце стику потім надівають пластикову муфту, яка його прикриває від пошкоджень. На таких стиках є втрати по 0.1...0.2 дБ за кожний стик, тобто на 324 км де порядка 108 стиків, додатково втратимо 11-22 дБ.

Щоб на котушку намотати 40 км кабелю, нам потрібний простий оптоволоконний кабель без додаткових шарів, по 6 мм. Тоді технологічні стики будуть кожні 40 км, порядка 8 стиків і втрати уже будуть в районі 0.8-1.6 дБ. Для цього нам потрібно замовити два КАМАЗа з параметрами вантажного відсіку (5,4

м * 2,4 м) та дерев'яною підлогою. Два КАМАЗа обійдуться дешевше ніж оренда однієї фури.

Технологія по лініям електропередач відпадає через те, що: в містах це некрасиво, сильно дорого, оскільки за стовпи потрібно платити більшу оренду ніж за каналізацію. Но на міжгородові задачі ця технологія згодиться, але не повсюди є телеграфні стовпи вздовж доріг, а на високовольтні не дозволено.



Рис. 5.2 — Загальний вигляд котушки, що використовуються в дипломній роботі [15]

Так, як ми обрали прокладання кабелю через гофротрубу нам потрібно підібрати відповідний діаметром 6 мм кабель і найнижчим коефіцієнтом затухання. Нажаль на ринку України немає кабелю з малим коефіцієнтом затухання. Найменше значення, що може надати дати ринок України це 0,21 дБ/км. Розглянемо кабелі з таким значенням коефіцієнта затухання: ОМЗКГМ та ОМЗКГЦ. Кабель ОМЗКГМ призначений для прокладки в ґрунтах всіх категорій, крім схильних мерзлотних деформацій, в кабельної каналізації, трубах, блоках, колекторах, тунелях на мостах і в шахтах, через неглибокі болота і несудноплавні річки. У кабелях ОМЗКГМ аналогічно кабелю ОМЗКГЦ використовуються оптичні волокна відповідно до рекомендацій ITU G.651, G.652, G.655, G.652.C.

Центральним силовим елементом ОМЗКГЦ є склопластик. На вимогу замовника кабель ОМЗКГМ виготовляється в оболонці з негорючого матеріалу. Виготовлений провідними виробниками кабель ОМЗКГЦ відповідає всім галузевим стандартам.

Недоліки таких кабелів для даної дипломної роботи:

1. Великий коефіцієнт затухання, що означає на кожному кілометрі ми будемо втрачати 0,21 дБ, то при 324 км ми втратимо 68 дБ.
2. Великий діаметр кабелю, через що потрібно буду більше котушок, що призводить до більшого числа технічних стиків — більші втрати.
3. Несхожість з технологією прокладання, яка була обрана раніше.

Переваги таких кабелів для даної дипломної роботи:

1. Доступність та ціна.

Таблиця 1. — Технічні характеристики кабелів [16]

Умови експлуатації і технічні умови		
Зовнішній діаметр кабелю (в залежності від конструкції)	ОМЗКГМ	13,7 – 17,6(мм)
	ОМЗКГЦ	
Номінальна вага (в залежності від конструкції)	ОМЗКГМ	133-149 (кг/км)
	ОМЗКГЦ	155-166 (кг/км)
Кабель ОКСТЦ стійкий до розтягуючих підсилень, не менше:		от 1,0 до 2,7 кН
Кабель ОКСТМ стійкий до розтягуючих підсилень, не менше:		2,7 кН
Кабелі стійкі до роздавлюючих підсилень, не менше:		400 н/см
Коефіцієнт загасання, на довжині хвилі 1550нм		0,21 дБ/км
Кількість волокон в модулі		4-16
Електричний опір зовнішньої оболонки (броня-земля) - не менше:		2000 МОм/км
Температурний діапазон використання кабелів:		-40.С +70.С
Кабелі призначені для монтажу і прокладки ручним і механізованим способом при температурі не нижче:		-10.С
Термін служби кабелів, не менше:		25 років
Максимально можливий радіус вигину кабелю під час монтажу не менше 250мм, при використанні не менше 20 номінальних діаметрів		

Тому підбирати кабель для дипломної роботи ми будемо із закордонних ринків. Оглянувши запропоновані варіанти на закордонних ринках, можна відмітити, що на російському ринку найменший показник затухання 0,17 дБ/км, а на японському 0,15 дБ/км — кабель Z+150 . Так як ми будемо оплачувати за транспортування кабелю, будемо обирати кращий із запропонованих по технічним параметрам кабель.

Таблиця 2. — Технічні характеристики кабелю Z+150 [13]

	PureBand® Submarine	Z Fiber®	Z-PLUS Fiber®	Z-PLUS Fiber® 130	Z-PLUS Fiber® 150
ITU-T Compliance	G.652.D	G.654.C	G.654.B, .D	G.654.D	G.654.D
Aeff μm ²	81	78	112	130	150
Attenuation dB/km	0.174	Std: 0.171 LL: 0.164	Std : 0.168 LL : 0.160 ULL : 0.154	ULL : 0.152	0.150
Chromatic dispersion ps/nm*km	16.5	18.5	20.5	20.5	20.9
Dispersion slope ps/nm ² *km	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
PMD ps/√km	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Кабель Z+150 має найменший коефіцієнт затухання в світі з тих, що зараз продаються на ринку — 0,15 дБ/км. Він має стандарт G.654 — одномодовий кабель зі зміщеною дисперсією та відсічкою. Це волокно було розроблено для передачі даних на багатокілометрові відстані в оптоволоконних лініях зв'язку під водою. Незважаючи на те, що кабель розрахований на підводні ВОЛЗ, він підходить і для нашої системи ВОЛЗ. Кабелі типу G.655, які розраховані для довгих ВОЛЗ не мають такого значення коефіцієнта затухання їх технологія ще не розвинена на даний час.

5.1.2. Гофротруба

Головним критерієм є рівень захисту кабелю та практичність труби, тому вибір пав на поліетиленову двостінну трубу. Ознайомившись із ринком гофротруб, я виділив для себе одну провідну компанію на ринку України, КОРОС. Через наступний ряд важливих переваг в порівнянні з конкурентами: мають тривалий термін служби — понад 60 років; пройшли стандартизацію і сертифікацію в Україні; виготовляються з матеріалів без присутності галогену і азбесту — тобто екологічно чистих матеріалів. КОРОС пропонує два вида труб: КОРОFLEX і КОРОDUR, а відрізняють вони один від одної тільки своєю практичністю.

КОРОFLEX — гнучка двостінна гофрована труба, яку поставляють в бухтах по 25-50 метрів з зондом-протяжкой і сполучними муфтами. Зовнішній діаметр від 40 до 200 мм. Радіусом вигину від 230 до 850 мм відповідно.

КОРОDUR — жорстка двостінна гофрована труба, яку поставляють відрізками по 6 метрів в комплекті зі сполучними муфтами. Зовнішній діаметр від 40 до 200 мм.

Практично ціною вони не відрізняються, але в ряд переваг по практичності був обраний тип труб КОРОFLEX. КОРОFLEX має багато видів труб по діаметру, обираємо трубу з найменшим діаметром — 40 мм, так як наш кабель всього 6 мм і більше ніж 40 мм нам не потрібно. На даний час на ринку компанії КОРОFLEX є три типи труб з діаметром 40 мм: UVFA, KF09040 та KF09040 FA. UVFA — це труба з захистом від ультрафіолету, що нам не потрібно а KF09040 від KF09040 FA відрізняються тільки кольором та ціною. Доплачувати 3 грн і 20 коп. за колір я не хочу і потреби в цьому не має, тому вибір падає на KF09040 FA.

KF09040 FA — це поліетиленова гофрована труба, яка служить для прокладки кабельних ліній під землею. Двостінна труба виробляється з поліетилену низького тиску і складається з двох шарів, що дає прекрасну

механічну міцність і максимальний термін служби. Труба має гнучкість і компактністю при транспортуванні, що створює додаткові переваги і економію коштів при виконанні монтажних робіт. [17]

Артикул	Тип	Колір	Зовнішній Д.	Внутрішній Д.	Радіус вигину	Довжина котушки	Розмір котушки	Ціна: 12,70грн
KF 09040	FA	Черный	40мм	32мм	230мм	50м	65x30см	за метр з НДС

Рис. 5.3 — Характеристики гофротруби KF09040 FA [12]

5.1.3. Оптичні модулі

Розглянемо відмінності XFP від SFP+ модуля. SFP модуль більш детально розглядати не будемо, так як SFP+ модуль це його розширена версія. XFP і SFP+ модулі є 10G оптичними модулями, і вони в основному використовуються в волоконно-оптичних мережах 10G. Однак між ними все ще є деякі відмінності:

1. XFP заснований на стандарті XFP MSA, а SFP+ модуль є розширеною версією SFP і заснований на SFP + MSA.

2. XFP сумісний з Fibre Channel 10G, але SFP+ модуль підтримує 8G Fibre Channel.

3. Розмір модуля XFP більше, ніж SFP 10 модуль, тому їх пакети відрізняються.

4. У порівнянні з XFP, SFP+ модуль залишає більше схем на материнській платі, а не всередині модуля, тому що він переміщує деякі функції на материнську плату, включаючи функцію модуляції сигналу, MAC, CDR і EDC.

5. Порти XFP приймають тільки модулі XFP, а SFP+ може приймати модуль SFP. [18]

Модулі XFP не такі популярні, як модулі SFP+, по параметрах вони практично однакові, а по ціні відрізняються в 3 рази. Тому вибирати ми будемо із модуль із моделей XFP. На довгих дистанціях використовуються завжди DWDM,

типовий — 40 каналний по, 10 Гбіт/с кожний, несучі частоти. DWDM модуль, який буде сумісний з іншими нашими компонентами системи, це оптичний модуль DWDM DDM XFP 80 км 1558.17/1600 нм LC GateRay GR-XF-D2480L-D. [18]

Таблиця 3. — Характеристики модуля GR-XF-D2480L-D [20]

Форм-фактор модуля	XFP
Швидкість передачі даних, Гбіт/сек.	До 11.3
Довжина хвилі передавача (Tx), нм	1558.17
Довжина хвилі приймача (Rx), нм	1260-1600
Довжина передачі даних, км	до 80
Потужність випромінювання, дБм	0...+5
Чутливість приймача, дБм	-24
Оптичний бюджет, дБ	15.5
Наявність функції DDM (Digital Diagnostics Monitoring)	Да
Тип роз'єму	LC
Робоча температура, градуси Цельсія	0~+70

Модель GR-XF-D2480L-D є змінним XFP-модулем від компанії GateRay, розробленим для одномодових оптичних волокон. Модуль має роз'єм Duplex LC і передбачає з'єднання по двом волконам. Пристрій має передавач, що працює на довжині хвилі 1558,17 нм при швидкості близько 11.3 Гбіт / с. Максимальна відстань передачі 80 км. Відмітна риса моделі GR-XF-D2480L-D — наявність DDM-функції, яка дозволяє в режимі реального часу контролювати ряд параметрів роботи модуля.

5.1.4. Раманівські підсилювачі

Оптичні підсилювачі мають сенс тому, що можна одночасно підсилювати 40 каналів, що займають смугу в 30-35 нм навколо центральної хвилі 1550 нм. Підсилювач вже потрібно підбирати такий, щоб був сумісний з нашими компонентами системи. RAMAN CL-BAND добре підходить для в якості

заключного компонента системи, їх нам потрібно в двох екземплярах, так як один буде на початку підсилювати наш сигнал, а інший буде підсилювати уже на кінці ослаблений сигнал.

Таблиця 4. — Характеристики підсилювача [11]

Підтримувані довжини хвиль, нм	1528 ~ 1604
Потужність оптичного накачування, мВт	400
Нерівномірність посилення з GFF, дБ	1.0
Нерівномірність посилення без GFF, дБ	2.0
Коефіцієнт шуму, дБ	0
Споживча потужність, Вт	30
Робоча температура, градуси Цельсія	0 ~ +60
Температура зберігання, градуси Цельсія	-40 ~ +85
Вологість навколишнього середовища, %	5 ~ +95
Габаритні розміри, мм	483x205x44 (1U); 483x205x89 (2U)

Таблиця 5. — Види та параметри підсилювача RAMAN CL-BAND [11]

Артикул	Робоча довжина хвиль, нм	Нерівномірність підсилення, дБ	Раманівське підсилення, дБ
FT-AMP-RCL6	1528~1604	<±2	6 (-0.5 ~ +1)
FT-AMP-RCL8	1528~1604	<±2	8±1.0
FT-AMP-RCL10	1528~1604	<±2	10±1.0
FT-AMP-RCL12	1528~1604	<±2	12±1.0
FT-AMP-RCL14	1528~1604	<±2	14±1.0
FT-AMP-RCL16	1528~1604	<±2	16 (-1 ~ +0.5)
FT-AMP-RCL6F	1528~1604	<±1	6 (-0.5 ~ +1)
FT-AMP-RCL8F	1528~1604	<±1	8±1.0
FT-AMP-RCL10F	1528~1604	<±1	10±1.0
FT-AMP-RCL12F	1528~1604	<±1	12±1.0
FT-AMP-RCL14F	1528~1604	<±1	14±1.0
FT-AMP-RCL16F	1528~1604	<±1	16 (-1 ~ +0.5)

Принцип роботи таких підсилювачів заснований на ефекті Рамана (розподілений нелінійний ефект, що виникає по довжині оптичного волокна). У волокно лінії надходить потужний оптичний сигнал, який взаємодіє з молекулами кварцу, що знаходяться в серцевині оптоволокна, що і викликає оптичне посилення. Оптична смуга пропускання C & L-Band діапазону: 1528 ~ 1604нм.

Висновок по обладнанню. Всі компоненти системи сумісні один з одним і мають хороші параметри та відгуки від споживачів. Нажаль не всі складові системи є доступними в ціні для звичайного споживача.

5.2. Розрахункова частина системи

Маємо кабель Z+150 із коефіцієнтом затуханням, 0.15 дБ/км, то для нашої задачі 324 км загальне затухання буде $(324 \text{ км}) \cdot (0.15 \text{ дБ/км}) = 48,6 \text{ дБ}$.

Наш приймач GR-XF-D2480L-D має чутливість -24дБм, де дБм — це децибел-міліват, тобто в абсолютних цифрах це означає $10^{(-2.4)} \text{ мВт} = 0.0039 \text{ мВт} = 3,98 \text{ мкВт}$.

Випромінювач GR-XF-D2480L-D має потужність 5 дБм. В абсолютних одиницях це $10^{(0.5)} \text{ мВт} = 3.1622 \text{ мВт} = 3162.2 \text{ мкВт}$. Це означає, що із застосуванням цього типу випромінювача та детектора допустиме затухання в лінії може $(5) - (-24) = 29 \text{ дБ}$, або в термінах «підсилення», то підсилення буде від'ємним — -29 дБ.

Якщо використовувати кабель із затуханням 0.15 дБ/км, то такого затухання він дасть на відстані $(29 \text{ дБ}) / (0.15 \text{ дБ /км}) = 193 \text{ км}$. А нам потрібно 300 км, і затухання на такій довжині буде, як ми вже бачили, 48,6 дБ. Тобто, решту між 48,6 дБ та 29 дБ = 19,6 дБ повинні покрити два підсилювачі — на вході і на виході лінії.

Як ми візьмемо два однакові RAMAN CL-BAND підсилювачі, це означає, що кожний повинен забезпечити підсилення на $19,6/2 = 9,8 \text{ дБ}$ або в $10^{0,98} = 9,54$ разів. Характеристики нашого підсилювача дозволяють взяти перший на декілька дБ сильний ніж другий, це робить для того, щоб сигнал не загубився серед шумів на такій відстані, а на початку оптоволокну витримає дану потужність.

Тоді візьмемо перший підсилювач на 14 дБ, а другий на 12 дБ, це більше ніж нам потрібно але кожний такий підсилювач має похибки в 1-2дБ і взяти

трішки з запасом. Перший підсилює на 14 дБ, або в $10^{1,4} = 25,11$ разів, а другий на 12 дБ, або в $10^{1,2} = 15,84$ разів.

Вхідний сигнал на перший підсилювач є 5 дБм = 3162.2 мкВт, то після нього він повинен піднятися до (5 дБм) + (14 дБ) = 19 дБм, або (3162.2 мкВт) * 25,11 = 78.4 мВт. Так само і другий підсилювач — у нього на виході має бути -24 дБм = 3,98 мкВт. Якщо він підсилює на 12 дБ, то на його вході сигнал має бути (-24) - (12) = -36 дБм, або 3,98 мкВт / 15,84 = 0.25 мкВт.

Наші підсилювачі RAMAN CL-BAND працюють в такому ж діапазон, що і оптичний модуль GR-XF-D2480L-D. В оптичному модулі нам потрібні дві характеристики, це максимальна потужність випромінювача P_v та мінімальний рівень чутливості детектора P_d .

Перевіримо баланс або бюджет потужності на лінії:

Випромінювач - підсилювач1 - кабель - підсилювач2 - детектор:

$$P_v + K1 - ZL + K2 - X > P_d, \text{ де}$$

P_v — максимальна потужність випромінювача = 5 дБм.

P_d — мінімальний рівень чутливості детектора = -24 дБм.

ZL — затухання кабелю = Z дБ/км = 0,15 дБ/км і L — лінія довжиною 324 км, яка матиме затухання ZL дБ = 48,6 дБ.

$K1$ — коефіцієнт підсилення підсилювача дБ = 14 дБ.

$K2$ — коефіцієнт підсилення підсилювача дБ = 12 дБ.

X — втрати при технічному стику, 0,1-0,2 дБ кожні 40 км — на 324 км втрати будуть в межах від 0,81-1,62 дБ. Будемо опиратися на максимальні втрати для розрахунку.

Тоді згідно формулі у нас виходить все правильно:

$$5 \text{ дБм} + 14 \text{ дБ} - 48,6 \text{ дБ} + 12 \text{ дБ} - 1,62 \text{ дБ} > -24 \text{ дБм}$$

$$-19,22 \text{ дБм} > -24 \text{ дБм}$$

Або якщо дивитися в кілометрах то:

$$L < (P_v - P_d + 2K) / Z$$

$$324 \text{ км} < (5 \text{ дБм} - (-24 \text{ дБм}) + 14 \text{ дБ} + 12 \text{ дБ} - 1,62 \text{ дБ}) / 0,15 \text{ дБ/км}$$

$$324 \text{ км} < 355 \text{ км}$$

Тобто наша схема ВОЛЗ типу NIL в розрахункових дослідженнях повністю задовольняє дипломне завдання. Впевнимось, ще в одному параметрі: дисперсія, деградує сигнал чи ні. Зазвичай в кабелях суттєва деградація спостерігається починаючи з дистанцій 1000...5000 км. Наш сигнал не деградує так як ми використовуємо волокно типу G.654, яке має малий коефіцієнт хроматичної дисперсії 0,06 пс/(нм×км).

Дана схема ВОЛЗ типу NIL не працює в двох напрямках. Для того щоб вона працювала в двох напрямках нам потрібно ще по одному підсилювачі RAMAN CL-BAND на кожний з кінців. Оптичний модуль може як приймати, так і передавати сигнал. Оптичний кабель має 72 жили волокон, а модуль розрахований на 1 канал — 1 канал, це 2 жили волокна, тобто на кінцях кабель оголяється на декілька метрів (2-3 м), щоб можна було пропустити одну жилу в один підсилювач, а іншу в інший, потім ці жили в один канал модуля. Через, що у нас залишається 70 вільних жил, які ми можемо виставити на продаж.

ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломної роботи було проаналізовано технологію прокладання ВОЛЗ, принцип роботи системи DWDM та раманівських підсилювачів, розроблено систему ВОЛЗ типу NIL між населеними пунктами на відстані 324 км.

В першому розділі роботи розглянуто поняття про ВОЛЗ, мета даної роботи та актуальність ВОЛЗ на сьогодні. Наведені основні причини чому ВОЛЗ типу NIL має велику актуальність. Також було проаналізовано поняття про ВОЛЗ, основні компоненти, схема та надоліки з перевагами. З'ясовано чому ВОЛЗ витіснила систему мідних кабелів з списку актуальних та розібрано основні переваги над мідними лініями зв'язку.

У другому розділі було розібрано поняття про оптичне волокно, сформовано вимоги до типу волокна, які висувають користувачі. Дані вимоги, відповідно до параметрів було розподілено на 6 груп: одномодове: стандартне, зі зміщеною дисперсією, з ненульовою зміщеною дисперсією, з зміщеною дисперсією та відсічкою, з великим ефективним перерізом та багатомодове. Розібрані технічні вимоги до кабелів, їх захист від навколишнього середовища та технологія прокладання. З'ясовано, між якими населеними пунктами не має ВОЛЗ та приведена порівняльна характеристика провідних компанії ВОЛЗ в Україні.

В третьому розділі було розібрано процес роботи WDM та DWDM-системи. Розглянуто, фактор роботи, які необхідні компоненти потрібні для їх роботи та сам принцип роботи цих компонентів. Приведено детальний огляд спотворення сигналу, розвиток та застосування цих систем.

У четвертому розділі було розглянуто принцип роботи раманівського підсилювача, приведено ілюстрацію, яка демонструє механізм роботи підсилювача та наведені формули для розрахунку коефіцієнта підсилення.

Розглянуто основні переваги та недоліки підсилювача для ВОЛЗ і на основі цих знань з'ясовано, що підсилювач добре підходить для довгих систем ВОЛЗ.

В п'ятому розділі було описано детальний поетапний процес створення системи ВОЛЗ типу NPL та функціонування системи. Також зроблено огляд та порівняльну характеристику всіх компонентів системи, представлених на ринку та визначено кращий варіант із запропонованих. Отримана в результаті система повністю задовольняє дану роботу та складається з декількох частин: оптичний модуль, підсилювач, кабель, підсилювач, оптичний модуль, якщо ж використовувати дану систему для двосторонньої передачі то потрібно додати по одному підсилювачу на кожний кінець системи. Всі частини системи, окрім даного кабелю можна замовити на території України.

Отримана система має досить широкий спектр використання. Через те, що кабель складається з 72 волокон, а ми використовуємо тільки 2 з них. Система може використовуватися в комерційних цілях. Додаткових витрат на підсилювачі робити не доведеться — 1 підсилювач може підсилювати відразу 40 каналів, а в нас їх буде 2 на кожному з кінців схеми, але додаткові витрати потрібно робити на оптичні модулі — 1 модуль це 1 канал, але є і більш дорогі оптичні модулі, які можуть перетворювати одночасно до 40 каналів — 40 каналні DWDM, в даній роботі не були застосовані через високу вартість.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Р.Р. Убайдулаев Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдулаев / М.: Эко-Трендз 2001г — 267с.
2. Андрэ Жирар Руководство по технологии и тестированию систем / А.М. Бродниковский, Р.Р. Убайдуллаев, А.В. Шмалько / WDM. – М.: EXFO, 2001.
3. О.Е. Наний LIGHTWAVE Russian Edition №2 / О.Е. Наний // Основы ВОЛС. Тематический выпуск «Компоненты DWDM систем и их характеристики» / 2005.
4. А.В. Леонов Усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния в оптических системах связи / А.В. Леонов, О.Е. Наний1, В.Н. Трещиков / УДК 681.7.068: 621.375.
5. Klaus Grobe Wavelength Division Multiplexing/ Klaus Grobe, Michael Eiselt/ 2014 by John Wiley & Sons, Inc.
6. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения — М.: Компания Сайрус системс, 1999р. / Иванов А.Б.
7. Biswanath Mukherjee Optical WDM Networks/ Biswanath Mukherjee / 2006th Edition.
8. Офіційний сайт Eurotranstelecom [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://9www.ett.ua/ru/>
9. Офіційний сайт Atracom [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.atracom.com.ua/ru/about-us/>
10. Офіційний сайт Інтертелеком [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.intertelecom.ua/info/trans-network>
11. Офіційний сайт Fibertrade [Електронний ресурс] — Режим доступу: https://fibertrade.ru/category/74_ramanovskie_usiliteli

12. Multimode vs. Single-Mode Fibre Optic Cable / Офіційний сайт Black Box [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.blackbox.co.uk/>

13. Офіційний сайт Sumitomo Electric [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://global-sei.com/>

14. Одномодовые оптические кабели и волокна на сетях связи / Офіційний сайт Сети и бизнес [Електронний ресурс] — Режим доступу: <http://www.sib.com.ua/>

15. Офіційний сайт ВОЛС.Експерт [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://vols.expert/>

16. Офіційний сайт Рос.Технологии [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://rostech.info/>

17. Офіційний сайт FlexiTech [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://flexitech.com.ua/>

18. Офіційний сайт FS [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://community.fs.com/>

19. Офіційний сайт GoogleMaps [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.google.com.ua/>

20. Офіційний сайт Comtrade [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://comtrade.ua>